

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Tokamak Compass D – Simulace magnetického pole
Tokamak Compass D – Simulation of magnetic field

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 6. 5. 2011

.....
Bc. Antonín Březina

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Markovi, Ph.D. za metodickou pomoc, cenné rady a vstřícný přístup. Panu RNDr. Radomíru Pánkovi, Ph.D., Ing. Davidu Šestákovi a jejich kolegům z oddělení tokamaku ÚFP Akademie věd České republiky za poskytnuté materiály.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na modelování elektromagnetických polí v tokamaku Compass D. Je zde nastíněn základní princip termonukleární fúze, plazma a lehce rozebrána hlavní termonukleární zařízení. Podrobněji je zde rozebrán základní princip zařízení tokamak. Práce se dále zaměřuje na tokamak Compass D, jeho hlavní části a více se zaměřuje rozbořením jeho cívek. Dále se zabývá tvorbou modelu komory tokamaku Compass D a jeho budících cívek. Na tuto část navazuje výpočet elektromagnetických polí pomocí programu ANSYS.

Klíčová slova

Fúze, termonukleární fúze, termonukleární zařízení, tokamak, Compass D, cívky tokamaku, toroidální cívky, poloidální cívky, elektromagnetické pole, intenzita elektromagnetického pole, ANSYS, metoda konečných prvků (MKP).

Abstract

This thesis focuses on the modeling of electromagnetic fields in tokamak Compass D. It also outlines the basic principle of nuclear fusion, plasma in a magnetic field, and slightly taken apart main nuclear facility. There is analyzed in detail the basic principle of a tokamak device. The work is also focuses on the Compass D tokamak, its main parts and more focused analysis of the coils. It also deals with making model of tokamak's Compass D chamber and magnetic coils. This part is followed by the calculation of electromagnetic fields using ANSYS.

Keywords

Fusion, thermonuclear fusion, thermonuclear devices, the tokamak, Compass D, tokamak's coils, toroidal coils, poloidals coils, electromagnetic field, intensity of electromagnetic field, ANSYS, finite element method (FEM).

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam	Jednotka
B	Magnetická indukce	[T]
E	Energie	[J]
E_{kin}	Kinetická energie (též pohybová energie)	[eV]
f	Frekvence	[Hz]
H	Intenzita elektromagnetického pole	[A.m ⁻¹]
I	Proud	[A]
P	Výkon	[W]
t	Čas	[s]
U	Napětí	[V]

Zkratka	Význam
BR	Horizontal magnetic field circuit
BV	Vertical magnetic field circuit
CAD	Computer aided design (počítačem podporované designování)
EFPS	Equilibrium field power supply
ELM	Edge localized mode (nestabilita okrajového plazmatu)
FFPS	Fast field power supply
MFPS	Magnetizing field power supply
MHD	Magnetohydrodynamický
MKP (FEM)	Metoda konečných prvků (finite element metod)
NBI	Neutral beam injection (vstřík neutrálních neutrálních svazků)
SFPS	Shaping field power supply
SOL	Scrape-off layer
TF	Toroidal field (toroidální pole)
ÚFP AV ČR	Ústav fyziky plazmatu Akademie věd České republiky

Další použité symboly a zkratky jsou vysvětleny v textu.

OBSAH

0	ÚVOD	1
1	TEORETICKÝ ROZBOR.....	2
1.1	Termonukleární reakce	2
1.2	Plazma.....	3
1.3	Termonukleární reaktory	3
1.3.1	Magnetické udržení	4
1.3.1.1	Tokamak a jeho princip	4
1.3.1.2	Stelarátor	6
1.3.2	Inerciální udržení	7
1.4	Provedení tokamaků.....	8
1.4.1	Limiter a divertor	8
1.4.2	Sférický a konvenční tokamak	9
2	ROZBOR TOKAMAKU COMPASS D.....	10
2.1	Historický vývoj	11
2.2	Vylepšení tokamaku	12
2.3	Výzkumný program.....	12
2.4	Provedení tokamaku a jeho hlavní části.....	13
2.4.1	Vakuová komora.....	13
2.4.2	Magnetické cívky.....	14
2.4.2.1	Cívky toroidálního pole	14
2.4.2.2	Cívky poloidálního pole	15
2.4.2.3	Sedlové cívky	18
2.4.3	Dodatečný ohřev	18
2.4.3.1	Ohřev neutrálními svazky	18
2.4.4	Systém diagnostik	19
2.4.4.1	Magnetická diagnostika	20
2.4.5	Mikrovlnná diagnostika.....	21
2.4.6	Spektroskopické diagnostiky	21
2.4.7	Diagnostiky svazků a částic.....	22
2.4.8	Sondy.....	22
2.5	Systém napájení	23
2.5.1	Generátory	23
2.5.2	Transformátory	24

2.5.3	<i>Stejnoseměrné měniče</i>	24
2.5.3.1	Napájení toroidálního vinutí	25
2.5.3.2	Napájení poloidálního vinutí	26
3	MODEL TOKAMAKU	28
3.1	Programy použité při tvorbě	28
3.1.1	<i>AutoCAD</i>	28
3.1.2	<i>ANSYS</i>	28
3.2	Tvorba modelu	29
3.2.1	<i>Model torusu a prostředí</i>	29
3.2.2	<i>Vytvoření výpočetní sítě</i>	30
3.2.3	<i>Budící cívky</i>	32
3.2.3.1	Toroidální cívky	32
3.2.3.2	Poloidální cívky	33
3.2.3.3	Celkový model cívek	38
4	SIMULACE MAGNETICKÉHO POLE	39
4.1	Přehled výpočtových proudů	39
4.1.1	<i>Toroidální a poloidální cívky</i>	39
4.1.2	<i>Celkový model cívek</i>	39
4.2	Přehled provedených výpočtů	40
4.3	Výsledkový přehled	41
4.3.1	<i>Výpočet č. 1</i>	41
4.3.2	<i>Výpočet č. 2</i>	42
4.3.3	<i>Výpočet č. 3</i>	43
4.3.4	<i>Výpočet č. 4</i>	44
4.3.5	<i>Výpočet č. 5</i>	45
4.3.6	<i>Výpočet č. 6</i>	46
4.3.7	<i>Výpočet č. 7</i>	47
5	ZÁVĚR	48
6	POUŽITÉ ZDROJE	49
	SEZNAM CD PŘÍLOH	51

0 ÚVOD

Současný rozvoj naší civilizace se netýká jen nás, lidské společnosti, ale i místa, kde žijeme, naší planety Země. Zásahy celého lidstva na zemský ekosystém jsou natolik velké, že bychom měli zvažovat každý budoucí krok. Každý neuvážený krok by mohl způsobit katastrofu. Měli bychom tedy zavrhnout veškerý technologický pokrok a vrátit se o pár století zpět? Odpověď zní: rozhodně ne!

Na druhou stranu, musíme vzít na vědomí, že jakýkoliv technologický pokrok vede k nárůstu spotřeby energie. Výroba této energie se neobejde bez vlivu na životní prostředí. Ocitáme se tak v situaci, z které, jak se zdá, není východiska. Zamyslíme-li se nad tím, zda existuje v dnešní době elektrárna, která by dokázala utišit poptávku po elektrické energii a byla natolik ekologická, že neznečišťuje okolní prostředí, musíme si odpovědět, že nikoliv.

V současnosti se zájem vědců soustřeďuje jediným směrem, a to ke zvládnutí termojaderné fúze. Termojaderná fúze může být realizována v několika typech zařízení, ať už pomocí inerciálního udržení nebo magnetického udržení. Nejbližší, k vytvoření funkční elektrárny, je zařízení tokamak. Uvnitř jeho nádoby je pomocí magnetického udržení vytvořena plazma o vysoké teplotě a následně zažehnuta deuter-tritiová reakce. Dodržením určitých podmínek a provedením této reakce nám fúze slibuje několikanásobný energetický zisk.

Úkolem této práce je provést rozbor tokamaku a vytvořit 3D stacionární analýzu magnetického pole. V první části se zmíním o základní termonukleární rovnici, plazmatu, více se budu věnovat termonukleárním zařízením, konkrétně zařízení tokamak a jeho provedení. V druhé kapitole se zaměřím na tokamak Compass D z ÚFP Akademie Věd ČR a rozeberu jeho hlavní části. V části třetí se zabývám tvorbou modelu tokamaku, konkrétně vytvořením komory, okolí a dále tvorbou cívek. V navazující části je provedena simulace elektromagnetického pole buzeného cívkami tokamaku.

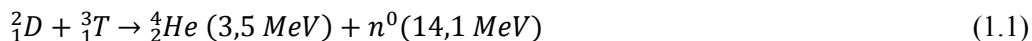
Závěrem této práce bude zhodnocení navrženého modelu 3D statické analýzy elektromagnetického pole tokamaku, vypočítaného pomocí metody MKP programem ANSYS.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

1.1 Termonukleární reakce

Termojaderné reakce probíhající v horkém plazmatu jsou teoreticky velmi výhodným zdrojem energie. Jako nejvýhodnější se jeví ty, které používají deuteria jako jednu z reagujících složek. Slučováním deuteria a tritia dochází k nejlepšímu poměru mezi dodanou a získanou energií. Deuterium je možné získávat z mořské vody, tím zde máme téměř nevyčerpatelný zdroj energie. Jeho zásoba je schopna pokrýt celosvětovou poptávku po elektrické energii na déle než miliardu let. [5]

K provedení termojaderné fúze je nezbytné překonat tzv. Coulombovské bariéry, umožnit tím jádrům lehčích prvků konat srážky a následně se rekonfigurovat v těžší prvky.



Slučováním deuteria a tritia vzniká hélium a rychlý neutron. Jádra vstupující do reakce je nejdříve potřeba urychlit na energii přibližně $E_{\text{kin}} = 20 \text{ keV}$. Tato energie umožňuje přiblížení jader na vzdálenost menší než 10^{-15} m a překonat tak zmíněnou Coulombovskou bariéru. Toho lze dosáhnout tak, že jádra srazíme dostatečnou rychlostí, kterou jim udělíme buď urychlovačem, nebo zahřátím na takzvanou zápalnou teplotu. Pro energetickou náročnost se první způsob nevyužívá. V plazmatu tak po srážkách vznikají jádra hélia 4_2H s energií 3,5 MeV a rychlé neutrony s energií 14,1 MeV. Vzniklá energie hélia slouží dále k ohřevu paliva. Energie rychlého neutronu je primárně určena k získávání elektrické energie a sekundární využití je v produkci tritia v doprovodných fúzních reakcích. [1]

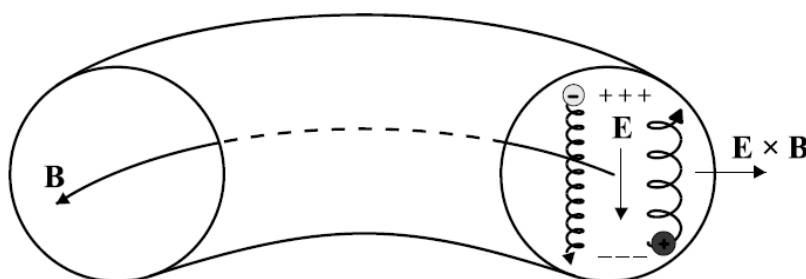


Pro kladný zisk tokamaku je nutné splnit Lawsonovo kritérium. Musí vzniknout více energie, než je potřebné k ohřevu a náhradě ztrát zářením. Musíme tedy splnit požadavek na teplotu plazmatu, hustotu iontů a dobu udržení plazmatu. [4]

1.2 Plazma

Obecně můžeme tvrdit, že plazma je tekutina nebo plyn, ve kterém se vyskytují volné nabitě částice v takovém množství, že znatelně ovlivňují fyzikální vlastnosti celého souboru. Abychom mohli mluvit o plazmatu, musí látka vykazovat dvě následující vlastnosti: musí vzniknout vzájemné elektromagnetické působení mezi nabitými částicemi, takzvané kolektivní chování, a musí být kvazineutrální. U kvazineutrálního plazmatu mohou být počty kladných a záporných nabitých částic libovolné, ale musí být stejné. [5], [9]

Plazma uvnitř tokamaku je stočeno do toroidální geometrie. Základním polem je toroidální pole, které sleduje plazmové vlákno. Je vytvářeno cívkou navinutou na plášť toroidu. Čistě toroidální pole vede na drift, ty způsobují únik nabitých částic z vnitřního prostoru tokamaku. V toroidální konfiguraci tak dochází k driftu zakřivení, který způsobuje separaci náboje, čímž vzniká elektrické pole a následný $E \times B$ drift umožňující únik částic. Částečně lze tomuto úniku zabránit vytvořením dodatečného poloidálního pole. Výsledné pole bude mít tvar šroubovice. Pohybem částic v tomto poli bude spojena oblast kladného a záporného náboje, v jistém slova smyslu dojde ke zkratování separovaného náboje. [10]



Obr. 1 $E \times B$ drift částic

1.3 Termonukleární reaktory

Termonukleární fúze se ubírá dvěma základními směry. Základním rozdílem mezi nimi je ve způsobu, jakým se z paliva získává horké plazma. První způsob spočívá v působení elektrického pulzu na zředěné palivo nacházejícího se v magnetických nádobách různého tvaru. V druhém způsobu se využívá vysoce výkonných světelných pulzů laserů, které soustředí své paprsky do spalovací komory. [4], [11]

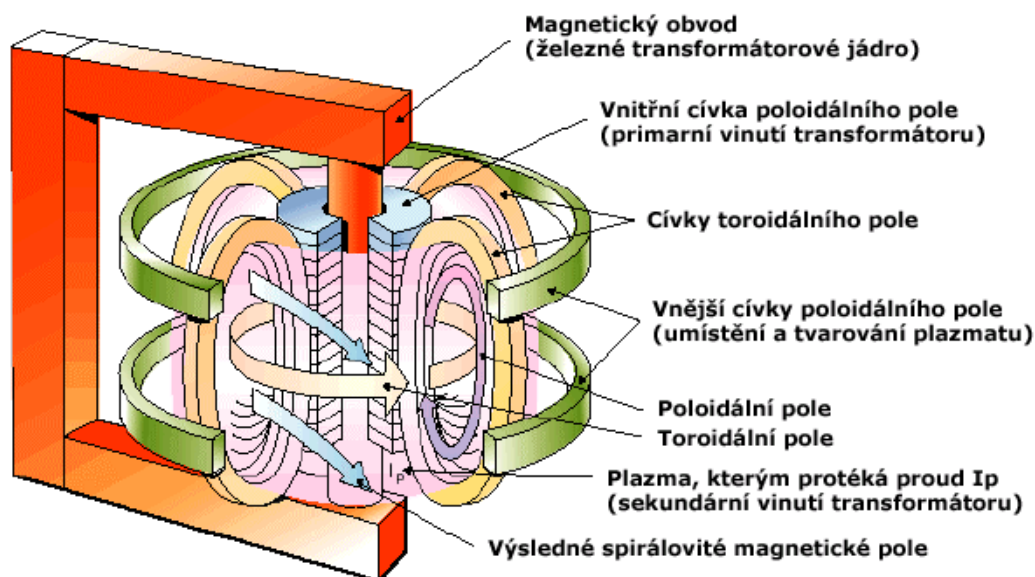
1.3.1 Magnetické udržení

V magnetickém udržení se plazma z pravidla nachází uvnitř komory. Využívá se zde silného magnetického pole, pomocí kterého je vymezována přesná poloha plazmatu. Toto magnetické pole rovněž indukuje proud procházející plazmatem, který je dostatečně silný na to aby dokázal svázat plazmatický paprsek a zamezil mu tak styk se stěnou komory.

Z historického hlediska můžeme nejrozumnější odzkoušené magnetické konfigurace rozdělit do dvou hlavních kategorií, podle toho, zda je magnetické pole na koncích otevřené nebo uzavřené do tvaru toru. S otevřenými konci jsou to theta-pinče, z-pinče a zrcadlová zařízení. Do druhé kategorie patří toroidální pinče, do kterých se řadí tokamak, a stellarátory. Dále je možné dělit zařízení s magnetickým udržením na systémy pracující v krátkém pulzu nebo pracující v ustáleném režimu alespoň potenciálně. [4]

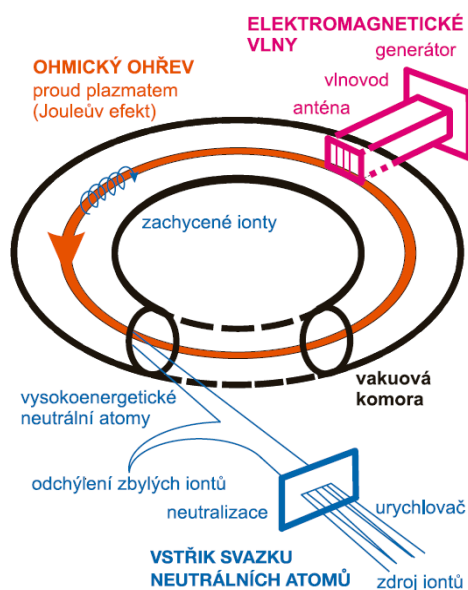
1.3.1.1 Tokamak a jeho princip

Zařízení tokamak vzniklo v 50. letech minulého století v týmu ruského akademika A. Sacharova. Tokamak je tvořen dutou komorou ve tvaru anuloidu, která je obklopena magnetickými cívkami. Základní schéma je uvedeno na obrázku 2. V tokamaku rozlišujeme orientaci v toroidálním a poloidálním směru. Toroidální cívky vytvářejí toroidální magnetické pole a jsou používány k vytváření plazmatu. Poloidální cívky jsou určeny k udržení plazmatického sloupce a k jeho řízení. Poloidální magnetické pole je vytvářeno proudem plazmatu. Obě magnetická pole se skládají do výsledného šroubovicového pole. Tokamak pracuje na principu transformátoru. Komora s plazmatem tvoří sekundární obvod transformátoru. [23]

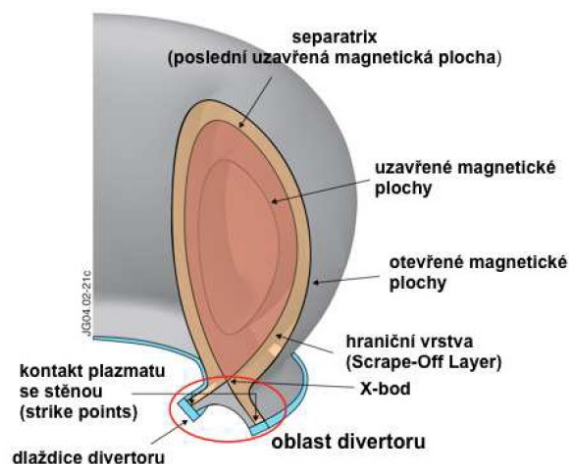


Obr. 2 Základní schéma tokamaku

Zavedením pulzu na primární vinutí je vybuzen elektromagnetickou indukcí proud v sekundárním vinutí, které je tvořeno slabě ionizovaným plynem. Takto ionizovaný plyn má značný odpor a je rychle zahříván Joulovým teplem. Tento ohřev je nazýván také jako ohmický. Zahříváním plazmatu na vysokou teplotu však klesá jeho odpor, tím se stává tento ohřev méně účinný. Z tohoto důvodu vznikly další metody pro ohřev, které jsou ohřev neutrálními svazky a metoda založená na absorpci elektromagnetického vlnění. Více informací v [23].



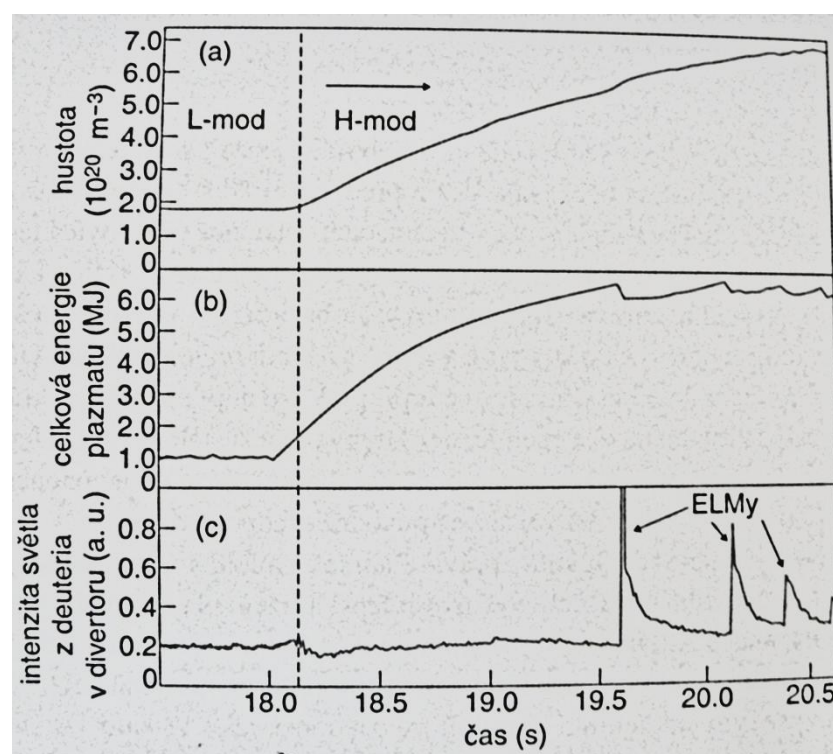
Obr. 3 Metody ohřevu plazmatu



Obr. 4 D tvar plazmatu

V současných tokamacích je profil komory konstruován ve tvaru písmene D. Tato konstrukce přináší řadu výhod, především možnost umístit do komory divertor. Více v kapitole 1.4.1. Typický tvar plazmatu pro nynější tokamaky je plazma ve tvaru D, ve kterém se nachází x-bod, místo, kde se kříží okrajová vrstva plazmatu (separatrix). Experimentálně bylo ověřeno, že je tento tvar pro energetickou fúzi nejvýhodnější. Dovoluje přejít do stavu s vyšším udržením, tzv. H-modu, kde se za určitých podmínek vlastnosti plazmatu náhle přeskupí a tím se zlepši udržení energie a částic. Zlepšení udržení energie je zpravidla dvojnásobné. [4], [7]

Ke změně režimu do H-modu je nutné, aby výkon ohřevu přesáhl určitou minimální hranici. Ve vyšším udržení vzroste na okraji hustota i teplota, v návaznosti na tento jev vzroste i teplota a hustota v centrální oblasti. V okraji plazmatu se obvykle objeví nestabilita, která vede ke ztrátám plazmatu v poryvech nazývaných ELMy (mody omezené na okraj). [4]

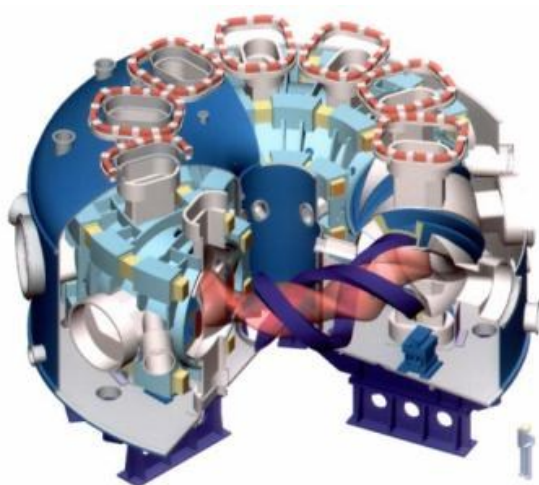


Obr. 5 Typické chování plazmatu při přechodu z L-modu do H-modu

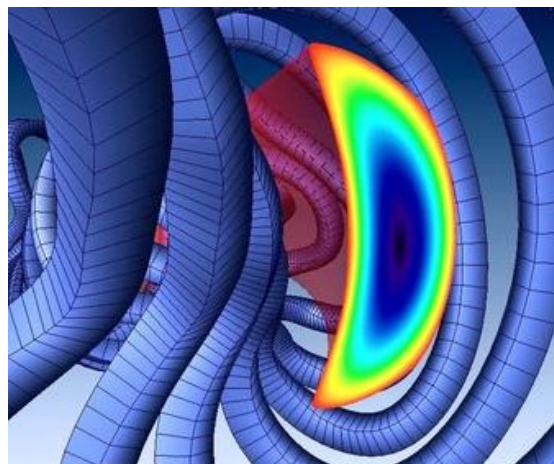
1.3.1.2 Stelarátor

Ve stelarátoru se plazma udržuje pomocí silného toroidálního magnetického pole, které vytváří vnější toroidální solenoid. Toroidální magnetické pole je bez proudu v plazmatu, který u tokamaku zabezpečuje silovou rovnováhu s rozpínavým plazmatem. Magnetické pole je nutné stočit kolem toru tak, aby každá siločára zavedla částice jak dovnitř, tak vně průřezu toru. Zařízení se neobejde bez složitých dodatečných cívek, které vytvářejí poloidální magnetické pole. Tyto cívky jsou drahé a musí se sestavovat s mimořádnou přesností. Stelarátory jsou provozovány s různými tvary cívek. Musí však splňovat základní princip, který vyžaduje spirálové toroidální pole.

V minulosti stelarátory za tokamaky zaostávaly, ale dnes už to neplatí. Dosahují srovnatelných rozměrů a srovnatelných dob udržení. Nejmodernější stelarátor Wendelstein 7-X, který je budovaný v Německu, by měl posunout stelarátory na stejnou úroveň s nejlepšími tokamaky a ukázat, že i tato zařízení mohou být základem pro budoucí termojadernou elektrárnu. [4], [12], [13]



Obr. 6 Japonský stelarátor LHD

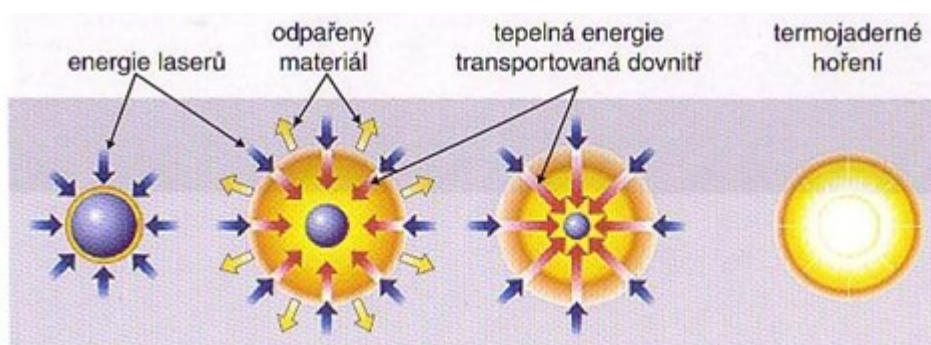


Obr. 7 Tvar plazmatu uvnitř cívek stelarátoru Wendelstein 7-X

1.3.2 Inerciální udržení

Hlavní myšlenkou realizace termojaderné syntézy pomocí inerciálního udržení je taková konstrukce reaktoru, kde energie zvyšující teplotu deuteria není dodávána elektrickými pulzy, ale světlem laserových paprsků. Palivo dosáhne podmínek k zapálení a hoření jenom, pokud je dostatečně rychle stlačeno a zapáleno.

Množství paliva je v malé (řádově miligramy). Tím zajistíme bezpečné uvolnění energie. Objem paliva je rovněž omezen výkonností laserů, protože musíme palivo dostatečně rychle zahřát. Jako palivo se využívá kulička směsi deuteria a tritia nazývaná pelet nebo terčik. V elektrárně pracující na tomto principu by se nacházela komora, ve které by se uskutečňovaly opakované miniexploze.



Obr. 8 Čtyři fáze zapálení inerciální fúze

Pro inerciální fúzi platí stejné podmínky jako pro magnetické udržení. Musí být splněny požadavky na teplotu plazmatu, hustotu plazmatu a dobu udržení. Zapálení terčiku probíhá ve čtyřech fázích. V první fázi se terčik rychle zahřívá pomocí energie laserů. Zahřívání terčiku vede k velice rychlému odpařování. Uvolněné plyny se odrážejí od neodpařeného materiálu a vzniká tím implozní rázová vlna, která vyvolává ohřev a zhutnění středu terčiku až do dosažení podmínek termonukleární syntézy. Fúzní energie je uvolňována v řádech nanosekund. [4]

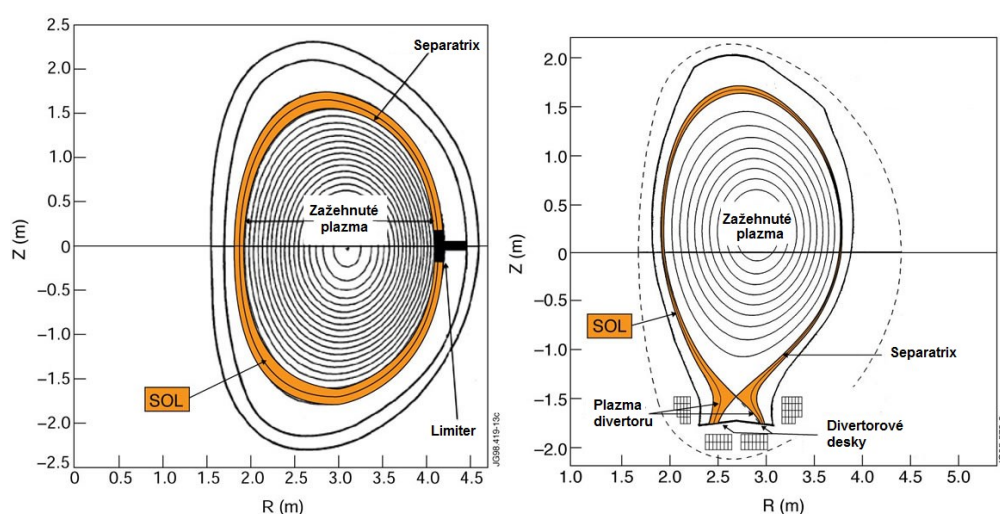
1.4 Provedení tokamaků

O každém zařízení tokamak můžeme říct, že je svým provedením jedinečné. V zásadě se skládají z několika základních komponent. Patří sem vakuová komora, vakuový systém, soustava cívek a systémů pro jejich řízení, energetické zdroje, systémy pro ohřev plazmatu a diagnostika.

Některé z částí již byly nastíněny v kapitole Tokamak a jeho princip. Neuvedené části jsou uvedeny v následující kapitole Provedení tokamaku a jeho hlavní části. Více informací v [23].

1.4.1 Limiter a divertor

Z důsledku nečistot, které vznikají interakcí plazmatu s materiálem komory, se v tokamaku vždy nachází dobře vymezená oblast, ve které přichází plazma do styku s materiálem vnitřní stěny. Materiál musí být zvolen tak, aby vydržel vysoké tepelné toky. Tomuto místu se říká limiter. Pomocí limiteru se vymezuje (limituje) velikost plazmatu. Obvykle jsou vyrobeny z kovu, který odolává vysokým teplotám, nebo se využívá lehkých kovů, jako je uhlík nebo beryllium. [1], [4]

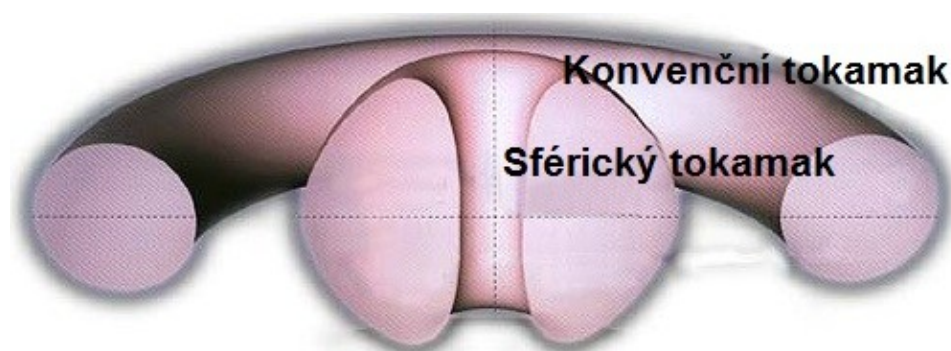


Obr. 9 Limiter a divertor na tokamaku JET

Další alternativou je zmírnit kontakt plazmatu s materiálem stěn magnetickým udržením, tzv. divertorem. V tomto případě jsou magnetické siločáry na okraji plazmatu záměrně odchýleny do zvláštní oblasti vakuové komory, vyhrazené pro interakci plazmatu s materiálem. To nám umožňuje sloupec vhodně tvarovat. Tato konfigurace umožňuje dvakrát lepší udržení plazmatu, výrazné snížení eroze materiálu stěny a tím i snížení znečištění centrálního plazmatu. Znázornění limiteru a divertoru je na obrázku 9. [1], [4], [14]

1.4.2 Sférický a konvenční tokamak

Ve sférickém tokamaku je plazma omezováno prakticky stejným způsobem jako v konvenčním tokamaku. Hlavní rozdíl, jak už nám říká název, je ve tvaru komory a magnetického pole. Sférický tokamak vypadá jako koule s dírou naskrz podél vertikální osy. Z technického hlediska, to znamená, že poměr šířky k výšce u sférického tokamaku je menší než u konvenčního typu. Někdy se udává, že průřez plazmatu je trojúhelníkový.

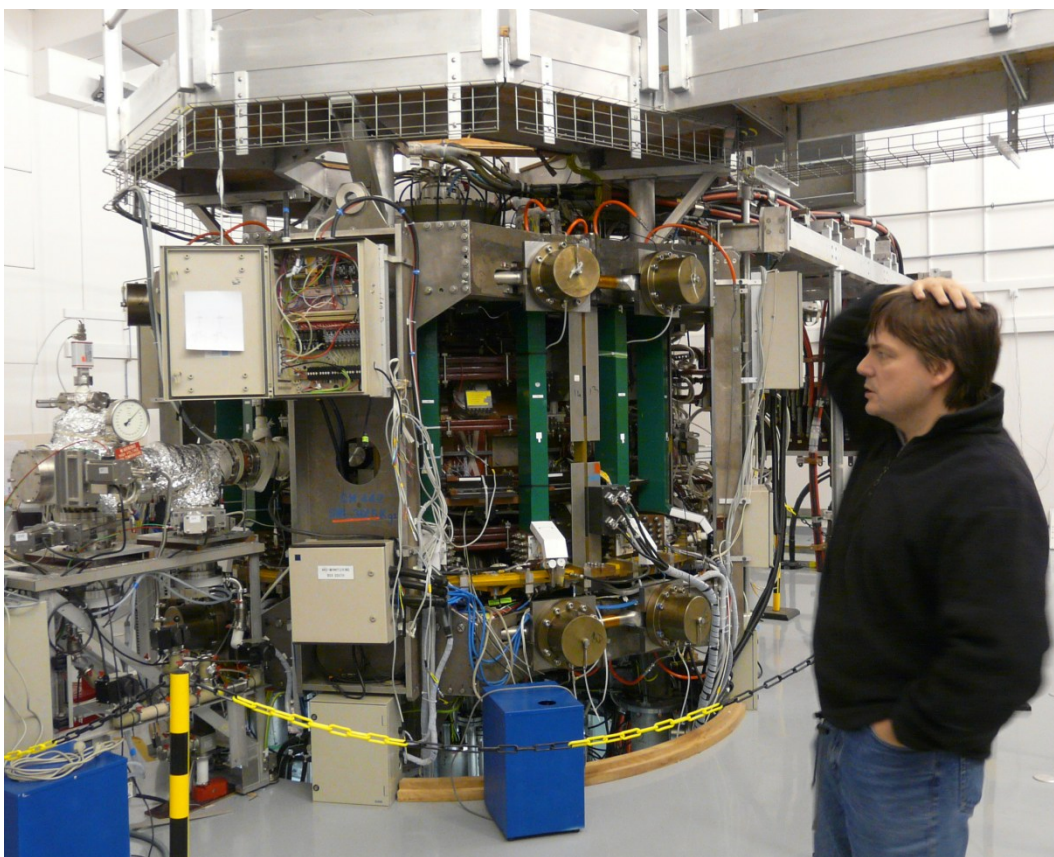


Obr. 10 Tvar plazmatu u sférického a kulovitého tokamaku

Výzkum kulovitého tokamaku je poměrně mladý obor, a z toho důvodu je mnohem méně rozvinutý než konvenční tokamak. Nicméně i přes tuto skutečnost se velice rychle vyvíjí a jsou zde náznaky, že některé teoreticky předpovídané výhody mohou být dosaženy. Bylo prokázáno například, že sférický tokamak může pracovat s mnohem vyšším tlakem plazmy (ve vztahu k síle magnetického pole) než konvenční tokamak. Tato skutečnost by mohla snížit potenciální náklady na provoz fúzního reaktoru. [16], [23]

2 ROZBOR TOKAMAKU COMPASS D

Tokamak Compass D je zmenšenou variantou tokamaku ITER, zejména konfigurace silného magnetického pole, je u obou zařízení shodná v měřítku 1:10. Nemůžeme ho však zařadit mezi termonukleární reaktory. Při své velikosti ještě nemůže uvolňovat termonukleární energii. Slouží pouze k fyzikálnímu výzkumu. Je to jedinečný experimentální nástroj určený k podobnostním studiím. Stává se tedy v těchto studiích menším, levnějším a přizpůsobivějším zařízením. Jeho rozměry jsou zárukou pružnosti a ekonomičnosti co se týče neplánovaných zásahů to výzkumného programu. Poskytuje nám mnoho potřebných dat k lepšímu pochopení plazmatu ve velkých tokamacích a často jako první umožňuje ověřit nové vědecké a technické myšlenky. [17], [18]



Obr. 11 Tokamak Compass D a RNDr. Jan Mlynář, Ph.D.

2.1 Historický vývoj

Název Compass D vznikl spojením dvou anglických slov „compact assembly“, což v překladu znamená kompaktní sestava. Byl zkonstruován v 80. letech ve výzkumném centru v anglickém Culhamu a hlavním účelem bylo studium fyziky plazmatu kruhového a „D“ průřezu.

V roce 1989 bylo v tokamaku zapáleno první plazma. Konfigurace vakuové komory byla kruhového průřezu. Byly v něm prováděny průkopnické experimenty, mezi něž patří experimenty s cívkami pro korekci magnetického pole pro tokamak ITER nebo s neinduktivním vlečením proudu v plazmatu.

V roce 1992 byla provedena změna konfigurace vakuové komory na D průřez. Bylo dosaženo výbojového režimu s vyšším udržením plazmatu (tzv. H-mod). Tento mód bude využíván jako referenční pro tokamak ITER.

V roce 2002 byl provoz tokamaku Compass D ukončen z nedostatku personálních a finančních zdrojů. Vzhledem k jeho nevyužitým možnostem a podobnosti s projektem ITER byl nabídnut Evropskou komisí a UKAEA v roce 2004 Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR, který měl již mnoho zkušeností s provozem malého tokamaku CASTOR.

V listopadu 2005 bylo schváleno převzetí tokamaku Compass D s vládní podporou.

V roce 2006 byl v ÚFP AV ČR zahájen projekt Compass D s preferenční podporou od CCE-FU EURATOM. Následovalo vypsání výběrového řízení na novou budovu a energetiku, vyřizování stavebního povolení a rozebrání tokamaku v Culhamu.

První plazma v tokamaku bylo generováno v prosinci 2008 a o tři měsíce později byl zahájen oficiální provoz.

V červenci 2010 se uskutečnily testy rychlého zpětnovazebního systému. [18]

2.2 Vylepšení tokamaku

Pracovníci ÚFP AV ČR museli nejen zprovoznit původní zařízení, ale vybavit ho zcela novými systémy. Mezi ně patřila energetika, logistika a vše co nebylo možné přivést z Anglie, neboť tyto systémy byly využívány pro tokamak MAST.

Provedení výkonového systému bylo plánováno ve dvou krocích. V první etapě byl proud v cívkách TF omezen na 52 kA s plochou fází trvající 1 s. Po úspěšném dosažení hodnoty 1,2 T se plánuje s vylepšením, které se skládá z:

- Navýšení toroidního magnetického pole na maximální hodnotu 2,1 T
- Vylepšení ohřevu plazmatu a systému řízení proudu

Zvýšením toroidního magnetického pole na 2,1 T a vylepšením tokamaku bude umožněno vykonávat experimenty relevantní pro ITER. [15], [17]

Tab. 1 Parametry tokamaku Compass D po převozu a po plánovaném vylepšení

Parametr	Po převozu	Po vylepšení
R	0,56 m	0,56 m
a	0,18-0,23 m	0,18-0,23 m
I_p (max)	200 kA	380 kA
B_T (max)	1,2 T	2,1 T
Tvar	D, SND, elipsa	D, SND, elipsa
Délka pulzu	0,5 s	0,5 s
P_{NBI}	0,6 MW	0,6 MW
P_{LHI}	0,4 MW	0,4 MW
$P_{ECRH1, 120GHz}$	-	1,5 MW

2.3 Výzkumný program

Výrazným rozdílem mezi tokamaky Compass D a Castor je, že Compass D umožňuje generaci vnější transportní bariéry, to je přechod do H-módu – do režimu s vysokým udržením energie plazmatu. [18]

- Vliv víceškálových procesů na L-H přechod
- Fyzika šířky pedestalu
- Práh L-H přechodu a techniky kontroly ELMů

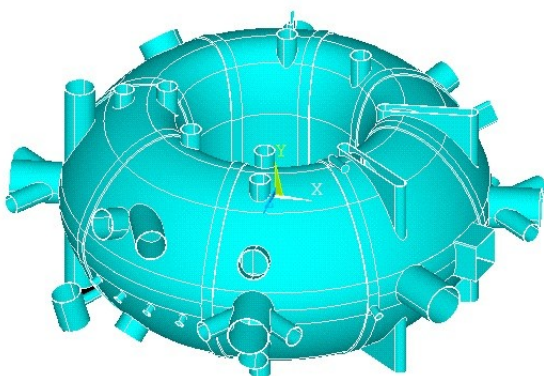
- Hystereze mezi L-H a H-L přechodem
- Vliv procesů atomové fyziky
- Turbulentní struktury a intermitence
- Teorie a modelování okrajové turbulence
- Módy lokalizované na okraj
- Realizační studie sondy atomového svazku
- Vývoj technik pro zdokonalený sběr a analýzu dat

2.4 Provedení tokamaku a jeho hlavní části

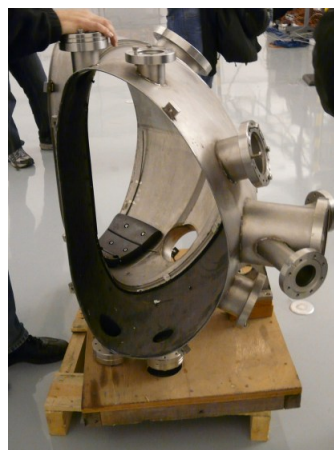
Tokamak Compass D se svou konfigurací řadí mezi sférické tokamaky. Skládá se z několika hlavních systémů.

2.4.1 Vakuová komora

Vakuová komora je tvořena toroidem ve tvaru písmene „D“. Materiálem komory je Inconel 625 s tloušťkou stěny 3 mm. Pro umožnění přístupu k plazmatu, různým diagnostickým zařízením a systémům pro ohřev, je komora vybavena 60 porty. Toroidální odpor je 0,63 mΩ, poloidální 0,25 mΩ. Vypékání se provádí při teplotě 150 °C. Objem komory je 1 m³ a povrch komory tvoří 8 m². Hodnoty vakua uvnitř komory je 10⁻⁶ Pa. Komora je vybavena grafitovým divertorem.



Obr. 12 Vakuová komora tokamaku Compass D

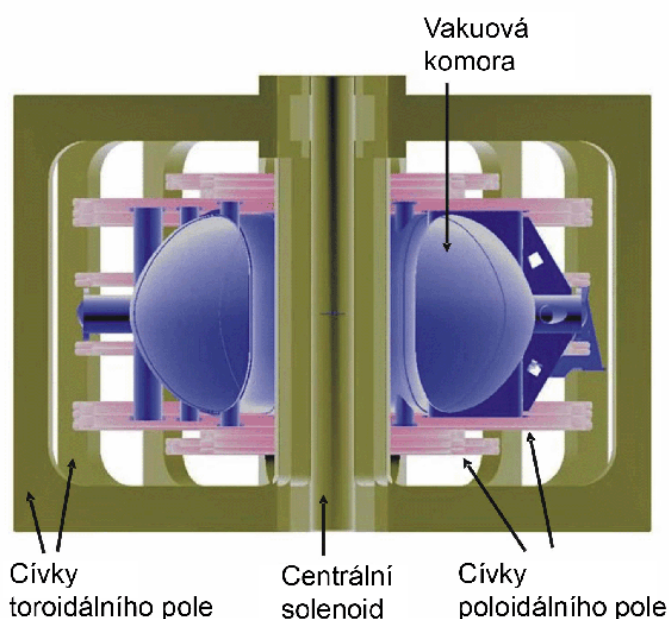


Obr. 13 „D“ průřez komory tokamaku

Vypékání komory tokamaku je prováděno ohmickým ohřevem pomocí OH transformátoru spolu s OH cívkami k dosažení dobré rovnoměrnosti. Cívky musí být chlazeny vodou. Napájení je provedeno z jednoho 250 kW tranzistorového zesilovače s frekvencí 400 Hz. [15]

2.4.2 Magnetické cívky

Magnetické cívky uvnitř tokamaku se dělí na toroidální a poloidální. Vodiče cívek jsou v provedení, které lze chladit vodou. Kapalina zde proudí středem vodiče.



Obr. 14 Model systému poloidálních a toroidálních magnetických cívek tokamaku Compass D

2.4.2.1 Cívky toroidálního pole

Toroidální pole tokamaku je vytvářené 16 rovnoměrně rozmístěnými cívkami. Cívky jsou navinuté v poloidální rovině a rovnoměrně obepínají komoru torusu. Každá cívka obsahuje 4 závity. Vodič je obdélníkového průřezu a je vyroben z 18 mm tlustého měděného plátu.

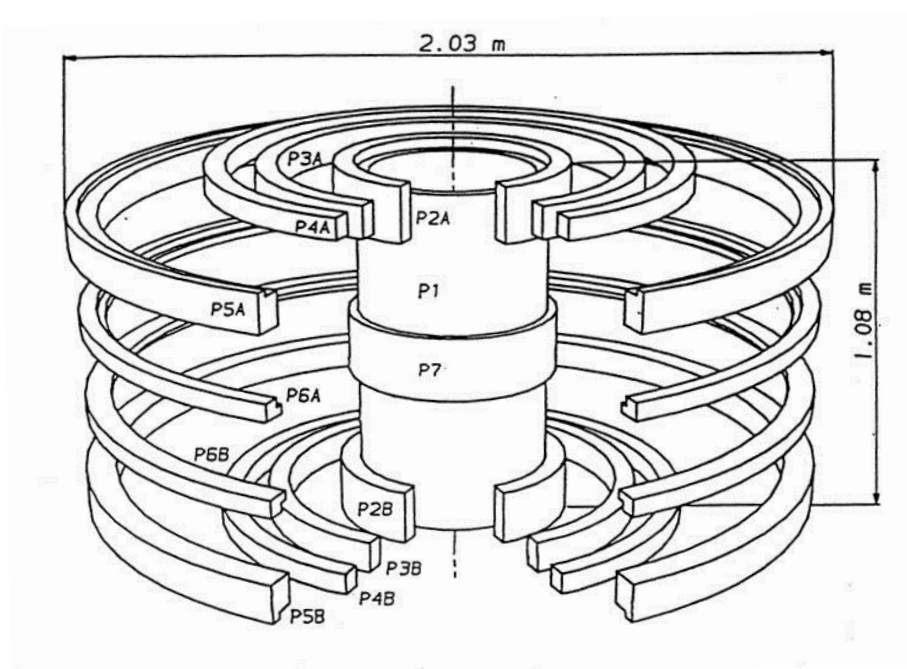
Vodiče v oblasti centrálního solenoidu jsou zúžené a uzpůsobeny odolat vnitřním silám. Každý závit je vodou chlazený. Maximální proud tekoucí těmito cívkami je plánován přibližně na 92 kA. Tento proud vyvolávat maximální hodnotu magnetického pole 2,1 T. Při síle vyšší, než 1,2 T je nutné použít systém pro kompenzaci magnetických sil. Napájení pro vytváření toroidálního magnetického pole je poměrně náročné, spotřebuje více než 50 % z celkového příkonu zařízení. [15]

Tab. 2 Parametry magnetických cívek

Toroidální pole (TF)	
TF na ose	0,8–2,1 T
Doba nárůstu	~ 1 s
Max. délka trvání proudu	1 s při 1,2 T
	0,5 s při 2,1 T
Doba poklesu	~ 1 s
Celková indukčnost	2,5 mH
Celkový odpor (20 °C)	2,7 mΩ

2.4.2.2 Cívky poloidálního pole

Poloidální cívky jsou navinuté v toroidálním směru (podél osy ϕ). Tokamak Compass D používá pět obvodů poloidálních cívek. Každý z těchto obvodů je řízen samostatným zdrojem a je složen z různě zapojených vinutí. Konstrukce těchto cívek umožňuje relativně jednoduché a nezávislé řízení sloupce plazmatu, jeho polohy a tvaru pomocí zpětné vazby. Z důvodu různých experimentů je možná rekonfigurace obvodů pomocí speciálních přepojovacích zařízení. [15]



Obr. 15 Třidimenzionální zobrazení cívek poloidálního magnetického pole

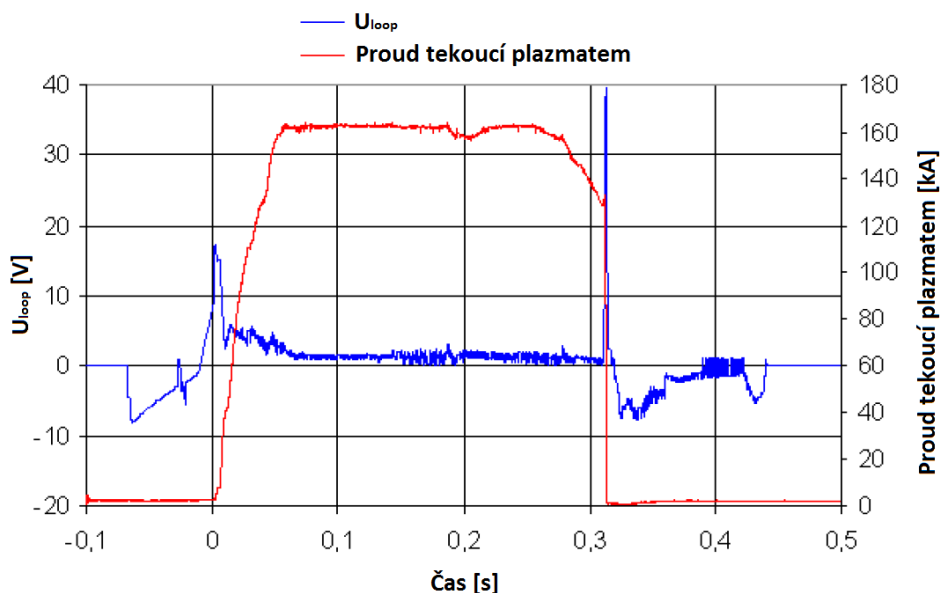
Tab. 3 Parametry magnetických cívek

Poloidální pole (PF)	
Max. proud plazmatem	350 kA
Doba vlečení proudu bez NBI nebo RF systémů	100–400 ms
Doba vlečení proudu s NBI nebo RF systémy	≤ 1 s
Doba nárůstu proudu	$\sim 30\text{--}100$ ms

2.4.2.2.1 OH/MFPS – magnetizační vinutí

Magnetizační vinutí tokamaku, které můžeme přirovnat k transformátoru, indukuje napětí na sekundární straně. V tomto případě je sekundární strana tvořena vakuovou komorou, ve které během pracovního cyklu dochází k výboji průrazem a následné ionizaci pracovního plynu. Toto vinutí je tvořeno dvěma systémy cívek, centrálním solenoidem a 4 páry cívek zapojených nad a pod komorou. Zapojení tohoto vinutí v tokamaku plní dvojí funkci a je napájeno v obou polaritách.

V první části průběhu je prováděn ohmický ohřev (OH). Dosáhneme ho pomocí záporné hodnoty proudu. V komoře tokamaku je zapalován a budován plazmový výboj. Toho se dosahuje hodnotou proudu přibližně 18 kA a následným kontrolovaným snižováním až do průchodu nulou. Dostatečně rychlá změna v čase indukuje ve vakuové komoře napětí U_{loop} , které způsobí lavinový průraz a zapálení plazmového výboje.



Obr. 16 Reálný průběh napětí U_{loop} a proudu plazmatu ve výboji #22053

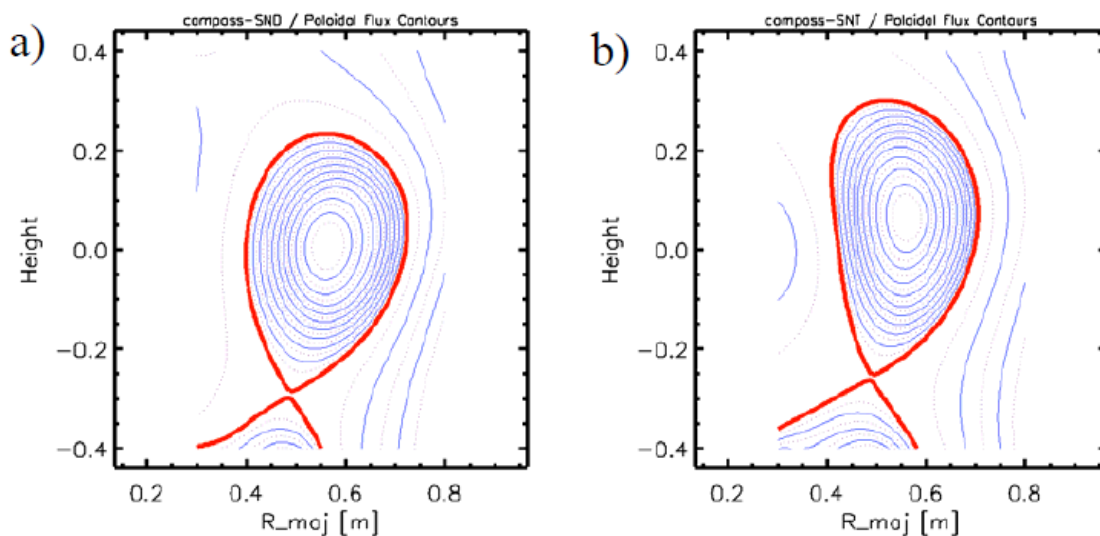
Při průchodu proudu nulovou hodnotou je připínán zdroj MFPS. Zdroj MFPS je regulován na stálý gradient nárůstu proudu. Na závit plazmového výboje (sekundární straně transformátoru) je indukována stálá hodnota napětí, která udržuje konstantní hodnotu proudu v plazmatu. Proud plazmatem je v rozmezí 150 kA až 400 kA. Dosažením stanovené doby, výboj kontrolovaným způsobem zaniká. [7], [15]

2.4.2.2 EFPS – rovnovážné vinutí

Pomocí tohoto zapojení je vytvářeno dodatečné magnetické pole, kterým je možné kontrolovat rovnovážnou polohu plazmatu. Korekce je prováděna zmenšováním hlavního poloměru R . Tento obvod je poměrně pomalý v případě výskytu vertikálních nestabilit. Tyto nestability vyžadují rychlejší odezvu. [7], [15]

2.4.2.3 SFPS – tvarovací vinutí

Tvarovací vinutí vytváří požadovaný tvar plazmatu v poloidální rovině. Tyto obvody jsou charakteristické pro všechny sférické tokamaky. Těmito cívkami je vytvářen takřka libovolný tvar plazmatu. Tvarovací vinutí je nejčastěji používáno pro dvě základní variace, SND a SNT plazma. [7], [15]



Obr. 17 Tvar plazmatu: a) SND plazma, b) SNT plazma

2.4.2.4 FFPS – rychlé zpětnovazební vinutí

Pomocí zpětnovazebního řízení je potlačován rychlý pohyb sloupce plazmatu uvnitř vakuové komory. V porovnání s EFPS dokáže zareagovat na rychlejší změny a vyžaduje také nižší výkon napájení. Obvody FFPS se dělí na obvod pro horizontální a vertikální stabilizaci. Horizontální poloha plazmatu je regulována pomocí pole vertikálního a vertikální poloha pomocí pole horizontálního. Cívky nesou název podle toho, jaké vytváří pole. Značka BV (B vertical) se

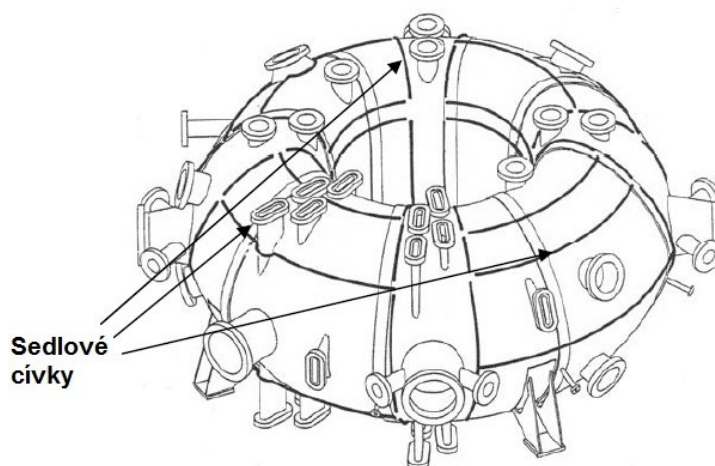
používá pro obvod, který vytváří vertikální pole a zajišťuje posuny v horizontálním směru. Zpětnovazební horizontální pole je vytvářeno obvodem BR (B radial). [7], [15]

Tab. 4 Parametry magnetických cívek

Rychlá zpětná vazba (FF)	
Max. vertikální pole na ose	200 mT
Reakční doba zpětné vazby	$\leq 300 \mu\text{s}$
Max. radiální pole na ose	10 mT
Reakční doba zpětné vazby	$\leq 100 \mu\text{s}$

2.4.2.3 Sedlové cívky

Compass D je vybaven čtyř kvadrantovým souborem sedlových cívek, které jsou plně konfigurovatelné. Vytvářejí takzvané rezonanční helikální pole. Na těchto cívkách se bude zkoumat možnost ovlivnění nestabilit okrajového plazmatu. Napájení je provedeno pomocí tranzistorových zesilovačů. [15], [17]



Obr. 18 Rozmístění sedlových cívek na komoře tokamaku.

2.4.3 Dodatečný ohřev

Dodatečný ohřev je nutný pro dosažení potřebné zápalné teploty. Vyjma ohmického ohřevu (OH), který zde byl již popsán, je tokamak vybaven mikrovlnným ohřevem a zařízením pro ohřev neutrálními svazky.

2.4.3.1 Ohřev neutrálními svazky

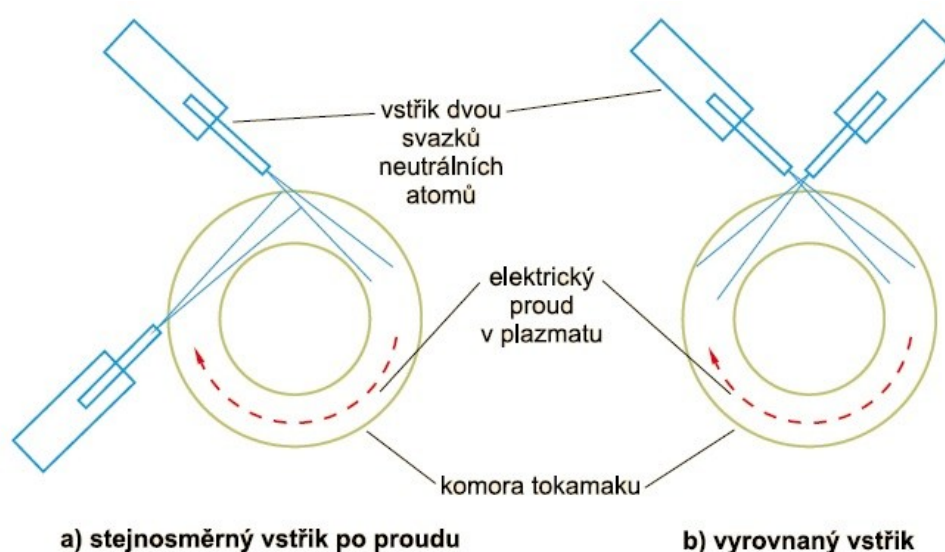
Tokamak byl vybaven systémem pro vstřik svazků vysokoenergetických neutrálních atomů (NBI) deuteria a vodíku umožňujícího dodatečný ohřev plazmatu a vlečení proudu.

Při konstrukci tohoto systému byla zohledněna krátká trajektorie neutrálních částic přes plazma, proto musel být systém pro výkon, energii a geometrie NBI vybrány velmi pečlivě.

NBI je složen ze dvou injektorů s energií částic 40 keV a výstupním výkonem 300 kW. Celkový výkon dodávaný do plazmatu je tedy 600 kW.

Vstřik ve směru proudu je optimalizován pro ohřev plazmatu. Tangenciální vstřik je optimální pro absorpci neutrálních atomů vzhledem k nejdelší dosažitelné trajektorii přes plazma.

V rozmístění pro tzv. vyvážený vstřik jsou oba injektory umístěny na stejném portu vakuové komory. Jeden z injektorů je umístěn ve směru proudu a druhý ve směru opačném (viz obr. 19b). Pomocí této konfigurace a při správné výkonové modulaci svazků je možné dosáhnout vysokého ohřevu plazmatu při současně minimalizaci jeho rotace. [18]



Obr. 19 Nastavení NBI systému

Tab. 5 Hlavní parametry NBI systému

Systém NBI	
Počet injektorů	2
Energie svazků	40 keV
Celkový proud iontů	2 x 12,5 A
Celkový výkonv neutrálech	2 x 300 kW
Délka pulsu	300 ms
Vstupní napětí	3 x 400 V
Celkový příkon systému	~ 1,5 MW

2.4.4 Systém diagnostik

Při řízení tokamaku musíme přimět ke spolupráci mnoho nezávislých komponent a systémů. Cílem je vznik plazmatu a jeho požadovaná teplota. Zkušenosti z jiných tokamaků jsou velice

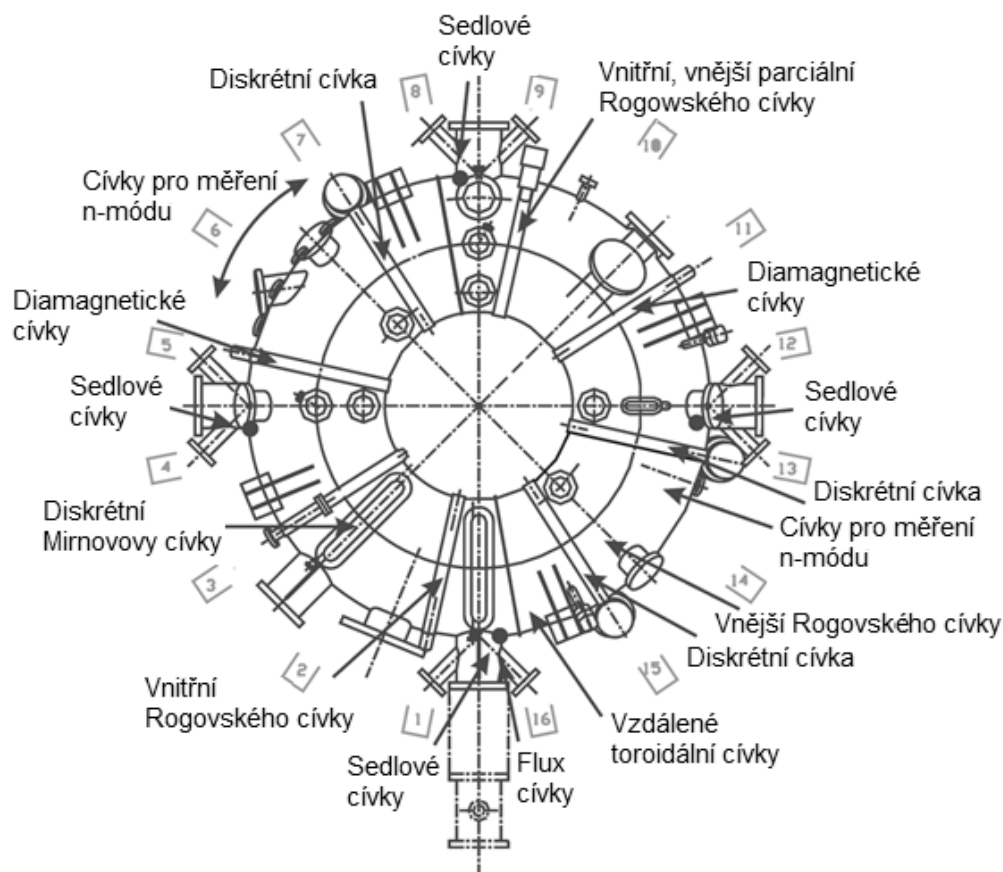
cenné, každý experiment je ale z hlediska řízení jedinečný a má své specifické vlastnosti. Řádná diagnostika je proto nezbytná. [4]

2.4.4.1 Magnetická diagnostika

Magnetická diagnostika umožňuje měření magnetických polí, jak poloidálních tak i toroidálních. Následně můžeme určit proudovou hustotu v plazmatu, celkový proud plazmatem, polohy plazmatu a jeho tvary, vodivosti plazmatu, celkové energie obsažené v plazmatu a získat informace o magnetohydrodynamických nestabilitách (MHD nestabilitách). Počet magnetických diagnostických cívek je více než 400.

Tab. 6 Přehled magnetické diagnostiky

Název cívky	Vnější nebo vnitřní umístění vzhledem ke komoře	Počet cívek	Účel měření
toroidální cívky	vnější	8	napětí na závit a poloidální magnetický tok
sedlové cívky	vnější	22 x 4 a 2 x 8	rozdíl v poloidálním magnetickém toku
vzdálené cívky	vnější	5	napětí na závit a poloidální magnetický tok
diamagnetické cívky	vnitřní	2	příčné beta
diamagnetické kompenzační cívky	vnitřní	2	toroidální pole
FCA cívky	vnější	16 x 3	horizontální, vertikální a toroidální magnetické pole
diskrétní Mirnovovy cívky	vnitřní	3 x 24 x 3	lokální poloidální, radiální a toroidální magnetické pole
cívky pro měření n-módu	vnitřní	4	n mód MHD nestabilit
divertorové Mirnovovy cívky	vnitřní	2x8	cívky zabudované v divertorových deskách
vnitřní parciální Rogowského cívky	vnitřní	16	lokální magnetické pole rovnoběžné z vakuovou nádobou
vnější parciální Rogowského cívky	vnější	16	lokální magnetické pole rovnoběžné z vakuovou nádobou
Rogowského cívky	1 vnější a 1 vnitřní	2	proud plazmatem a vakuovou komorou



Obr. 20 Rozmístění magnetické diagnostiky podél komory tokamaku

Cílem této diagnostiky je zmapovat magnetický povrch celého průřezu plazmatu a za použití některého z numerických kódů můžeme získat magnetický popis plazmatu. Ten zahrnuje rozložení proudové hustoty plazmatu a magnetických povrchů. S pomocí měření vnějších magnetických polí a měření rozložení proudové hustoty plazmatu můžeme řešit problém MHD rovnováhy. [18]

2.4.5 Mikrovlnná diagnostika

Mikrovlnná diagnostika obsahuje dvou frekvenční 2 mm mikrovlnný interferometr, mikrovlnný reflektometr a ECE/EBW radiometr. Pomocí těchto zařízení můžeme měřit elektronovou hustotu plazmatu ustředěnou podél průměru tokamaku, profil hustoty plazmatu v okrajové části a radiální profil elektronové teploty.

2.4.6 Spektroskopické diagnostiky

Tyto diagnostiky obsahují diagnostiku Thomsonova rozptylu, rychlé kamery pro detekci viditelného záření, mnohokanálový optický systém pro měření záření ve viditelném světle, bolometrickou diagnostiku, diagnostiku měkkého rentgenového záření a měření toroidální a poloidální rychlosti plazmatu v okrajové oblasti tokamaku.

Pomocí diagnostiky Thomsonova rozptylu je měřena elektronová hustota a elektronová teplota.

Rychlé kamery pro detekci viditelného záření dokážou zachytit viditelné záření bez spektrálního rozlišení a monitorovat interakce plazmatu s pevnými povrchy.

Mnohokanálovým optickým systémem pro měření záření ve viditelném světle můžeme pozorovat záření vodíku a nečistot plazmatu a jeho vývoj během výbojů, celkové vyzařování plazmatu ve viditelném světle z oblasti středového i okrajového plazmatu a prostorově rozlišené záření na vybraných spektrálních čarách vodíku a nečistot plazmatu.

Bolometrickou diagnostikou měříme celkový vyzařený výkon a jeho prostorové rozložení a ztráty energie zářením.

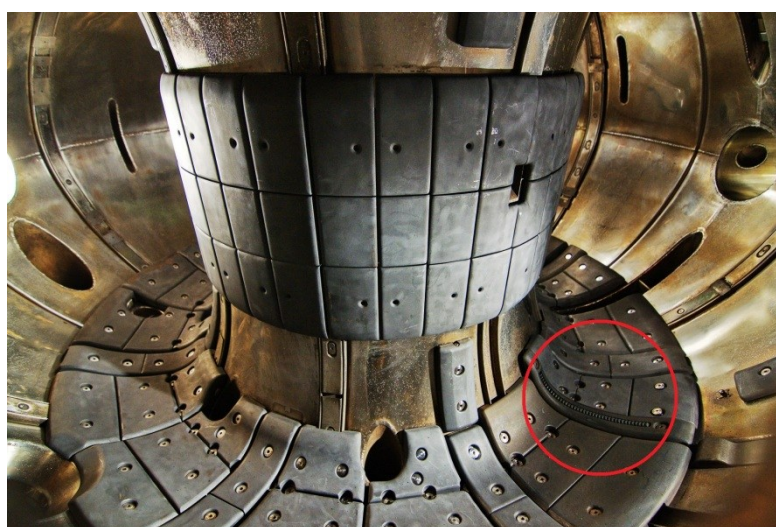
Rychlost plazmatu v okrajové části tokamaku, jak toroidální, tak i poloidální, je měřena diagnostikou měkkého rentgenového záření. [18]

2.4.7 Diagnostiky svazků a částic

Do diagnostiky svazků a částic patří spektroskopie záření svazku (BES), sonda atomového svazku (ABP) a analyzátor neutrálních atomů. Těmito diagnostikami vyhodnocujeme veličiny jako profil elektronové hustoty, fluktuace elektronové hustoty na okraji plazmatu, perturbace poloidálního magnetického pole, profil proudu plazmatu na okraji a energetickou rozdělovací funkci rychlých atomů vylétávajících z plazmatu.

2.4.8 Sondy

Mezi sondy patří divertorové sondy a dvě návratové (reciproké) sondy. Divertorovou používáme pro měření elektronové hustoty, teploty a plovoucího potenciálu v oblasti divertoru.



Obr. 21 Znárodnění divertorové sondy v komoře tokamaku

Návratovými sondami měříme vlastnosti mezi horkým plazmatem a stěnou. Měřené veličiny jsou radiální profily plazmatu, rychlost tečení plazmatu podél magnetických siločar, toky částic a energie plazmatu na stěnu a teplota iontů plazmatu. Z radiálního profilu plazmatu můžeme dále získat velikost elektrického potenciálu, hustotu a jeho teplotu.

2.5 Systém napájení

Tokamak Compass D byl po ukončení provozu v anglickém Culhamu přemístěn do Ústavu fyziky plazmatu AV ČR v Praze bez napájecích zdrojů. Původně byl napájen příkonem 50 MW po dobu 2 s až 3 s. Na místě opětovné instalace se nacházel bod vysokého napětí 22 kV, avšak s maximální kapacitou odběru 1 MW. Zvažovalo se několik řešení, která by požadovaný příkon zabezpečila. Zvítězila varianta akumulovat energii z existující veřejné sítě takzvaným setrvačnickým generátorem. Tento systém je již použit u několika tokamaků. [17]

2.5.1 Generátory

Jako zdroje energie jsou použity dva setrvačnické synchronní generátory se setrvačníky na hřídeli vytvářející autonomní napájecí síť 6 kV o proměnné frekvenci (65 – 85) Hz. Generátory jsou roztáčeny asynchronními motory na společné hřídeli přes frekvenční měnič ze sítě 3x 400 V, 50 Hz. Předpokládaná spotřeba energie byla přibližně určena na 80 MJ a špičkový výkon na 60 W. První setrvačnický je určen pro napájení cívek toroidálního magnetického pole a druhý pro cívky poloidálního magnetického pole, generátory svazků neutrálních částic a generátor elektromagnetického pole na dolněhybridní frekvenci. Druhý setrvačnický může zároveň sloužit jako záložní a tím zvýšit spolehlivost provozu. [15],[17], [19]



Obr. 22 Motor generátoru



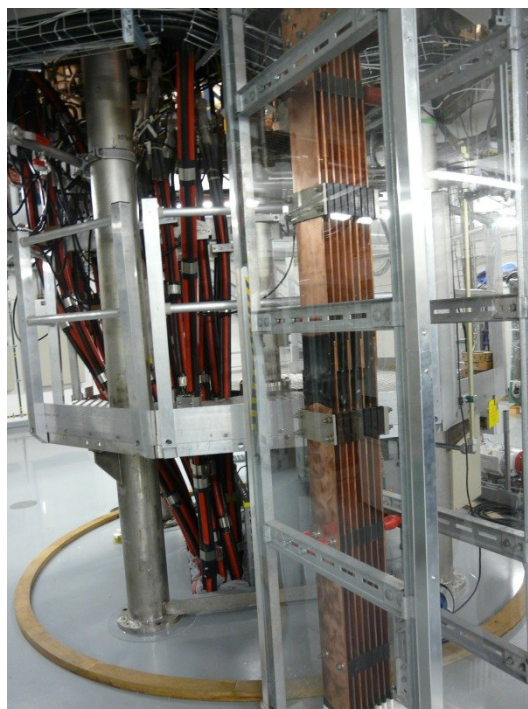
Obr. 23 Synchronní generátor

2.5.2 Transformátory

Napájecí soustava pracuje na několika napětových hladinách a je vybavena celkem 13 transformátory. Transformátory jsou členěny podle účelu napájení. Napájení diagnostiky a výkonové měniče vyžadují trvalé připojení k napájecí síti a jsou obstarávány dvěma transformátory. Další dvojice transformátorů zajišťuje napájení pro budící měniče synchronních generátorů. Šest transformátorů se stará o napájení pro tyristorové měniče toroidálního vinutí, EFPS, SFPS a OH/MFPS. Napájení zesilovače pro vinutí FFPS obstarává další transformátor. Poslední dva transformátory jsou použity pro ohřev neutrálními svazky a pro mikrovlnný ohřev. [8]



Obr. 24 Napájecí transformátory



Obr. 25 Přívodní kabeláž

2.5.3 Stejnosměrné měniče

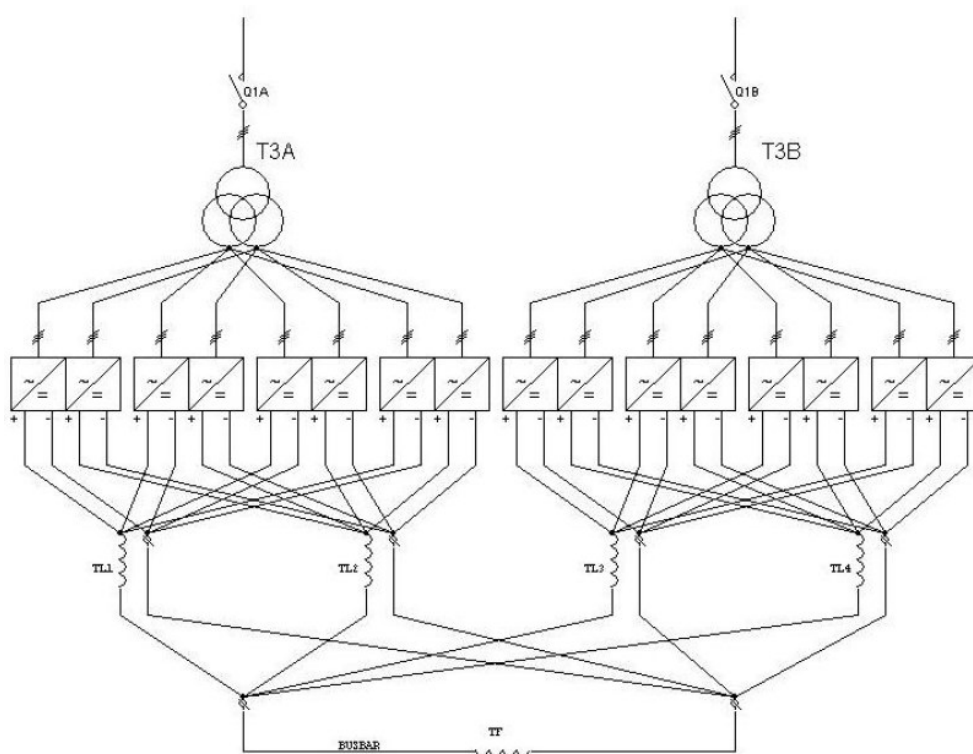
Jednotlivé měniče jsou připojeny k napájecí síti 6 kV přes snižovací transformátory a vypínače. Konstrukčně jsou všechny měniče sestaveny ze shodných tyristorových bloků, kde každý blok obsahuje šest tyristorů zapojených jako třífázový můstek, plovoucí přepětovou ochranu, jednotky pro převod optického řídicího signálu a měření teploty tyristorů. Měniče se dělí na napájení toroidálního a poloidálního vinutí. [8]

2.5.3.1 Napájení toroidálního vinutí

Pro parametry cívek toroidního vinutí (TF – toroidal field) jsou uvažovány dva stupně výkonů výboje, které odpovídají intenzitě magnetického pole buzeného toroidními cívkami:

- Pole 1,2 T, proud 52kA, po dobu 1 s, příkon přibližně 9 MW a energetický nárok přibližně 18 MJ.
- Pole 2,1 T, proud 92kA, po dobu 0,5 s, příkon až 27 MW a energetický nárok přibližně 40 MJ

Rozsah napětí je v rozmezí 150 V až 450 V, doba nárůstu a doběhu je 1 s a opakovací frekvence 5x za hodinu. [19]



Obr. 26 Zapojení měničů TF cívek

2.5.3.2 Napájení poloidálního vinutí

1. Parametry OH/MFPS

Proud plazmatu 150 kA/1 s, 250 kA/ 0,5s, s dodatečným ohřevem (250-400) kA/0,3 s

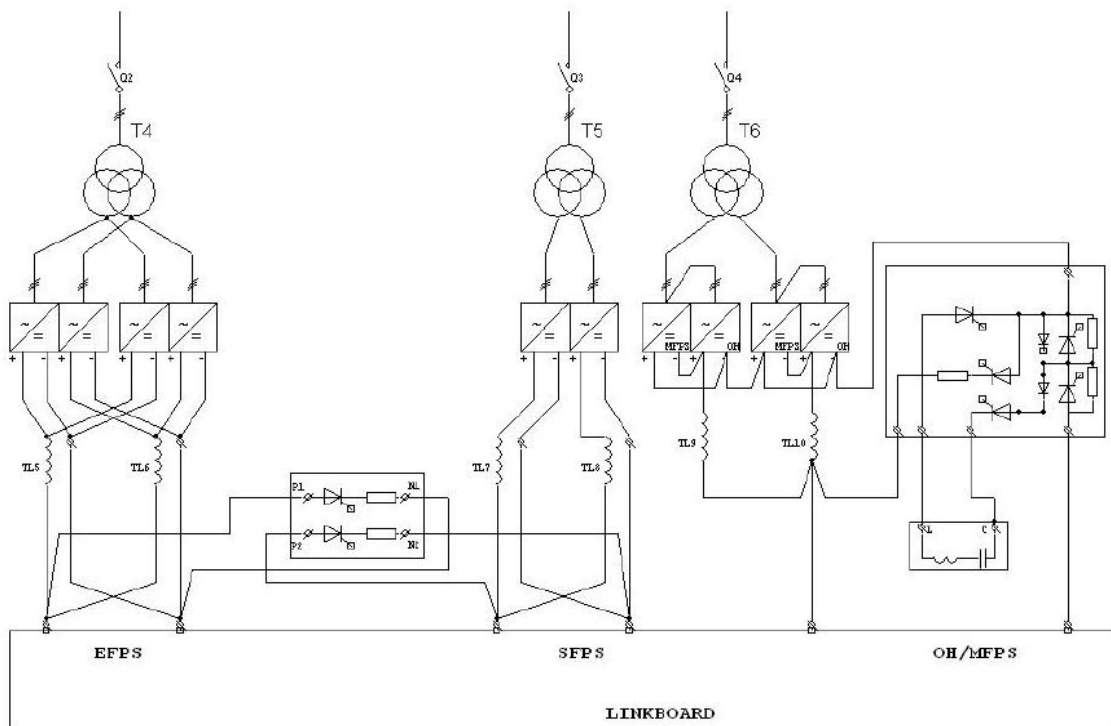
- a. 1. Fáze – zapálení výboje
 - 18 kA pro nabuzení magnetizačního vinutí
 - Řízený pokles a průchod proudu nulou
- b. 2. Fáze – proud rostoucí s definovaným gradientem pro udržení výboje
 - Napětí zdroje 650 V, proud (0-12) kA po dobu ≤ 1 s

2. Parametry EFPS

- Zdroj 265 V, DC
- Proud 7 kA, 1 s,
- Maximální proud 16 kA, 0,5 s
- Výkon \sim max. 5 MW,
- Spotřeba energie \sim max. 6 MJ

3. Parametry SFPS

- Zdroj 540 V, DC
- Proud 5 kA, 1 s
- Proud max. 12 kA, 0,5 s
- Výkon \sim max. 7 MW
- Spotřeba energie \sim max. 6 MJ



Obr. 27 Zapojení měničů poloidálních cívek

3 MODEL TOKAMAKU

3.1 Programy použité při tvorbě

Model tokamaku byl vytvořen pomocí programů AutoCAD a ANSYS. Rozměry komory, cívek a jejich rozmístění odpovídají reálným parametrům skutečného tokamaku Compass D. Parametry jsou uvedeny v CD příloze 1 a 2.

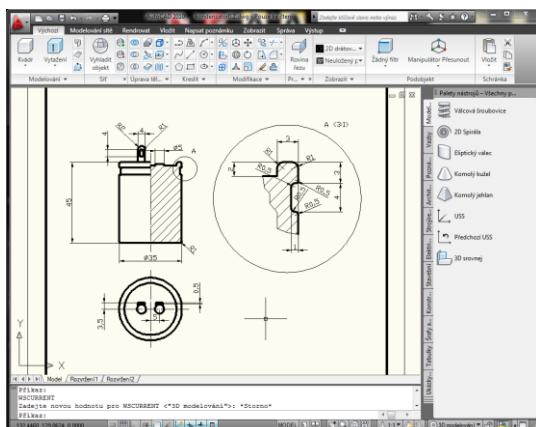
3.1.1 AutoCAD

AutoCAD je software pro 2D a 3D projektování a konstruování. Byl vyvinut firmou Autodesk. Na jádru programu byla vyvinuta řada profesních aplikací pro CAD v oblasti strojírenské konstrukce, stavební projekce a architektury, mapování a terénních úprav. Autodesk nabízí rovněž nespočet nástavbových aplikací z různých odvětví. [21]

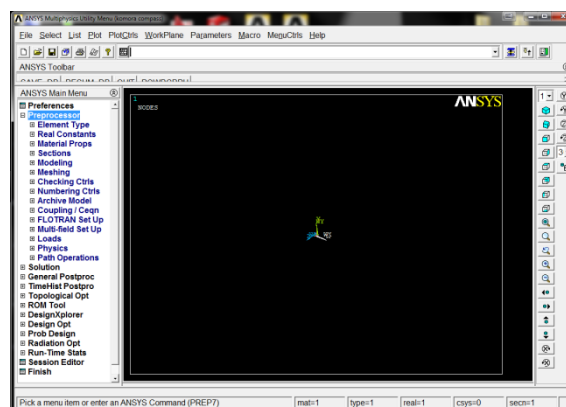
3.1.2 ANSYS

Program ANSYS je vyvíjen americkou společností ANSYS Inc. a v dnešní době zaujímá vedoucí pozici v tomto oboru. Program využívá metodu, mezinárodně známou jako FEM (finite element method), v českém překladu jako MKP (metoda konečných prvků). Metoda spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, tzv. elementů. Namísto řešení problému celého tělesa je problém formulován pro jeho jednotlivé prvky, v nichž jsou neznámé funkce přibližně popsány jen malým počtem parametrů ve zvolených bodech (uzlech). Následovně se systematicky sestaví řešení pro celé těleso. [24]

Program umožňuje simulovat nejen elektrická, magnetická, tepelná pole, ale také proudění kapalin a plynů. Hlavní výhodou ANSYSu je možnost tato fyzikální pole vzájemně kombinovat a jednotlivé úlohy tak řešit s maximální komplexností. [22]



Obr. 28 Program AutoCAD

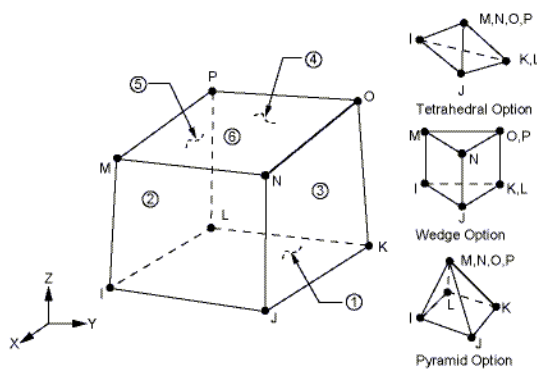


Obr. 29 Program ANSYS

3.2 Tvorba modelu

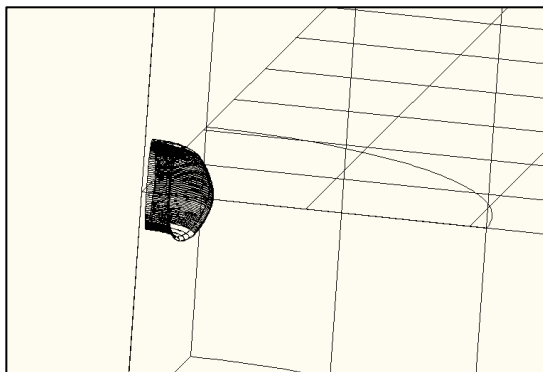
3.2.1 Model torusu a prostředí

Pro tuto úlohu byl zvolen typ elementu SOLID 96. Tento prvek je vhodný pro modelování 3D magnetických polí. Jeho tvar je definován pomocí 8 uzlů a vlastnostmi materiálu. Tvar elementu může nabývat tvaru čtyřstěnu, klínu a jehlanu.

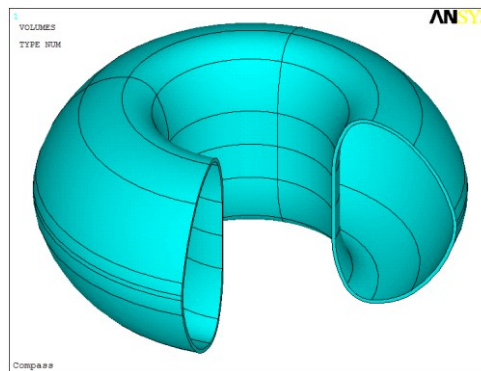


Obr. 30 Znáznornění elementu

Pro zjednodušení postupu byl model komory vytvořen v programu AutoCAD a dále exportován do prostředí programu ANSYS, kde byly vytvořeny jednotlivé objemy a dále rozděleny na jednotlivé komponenty.

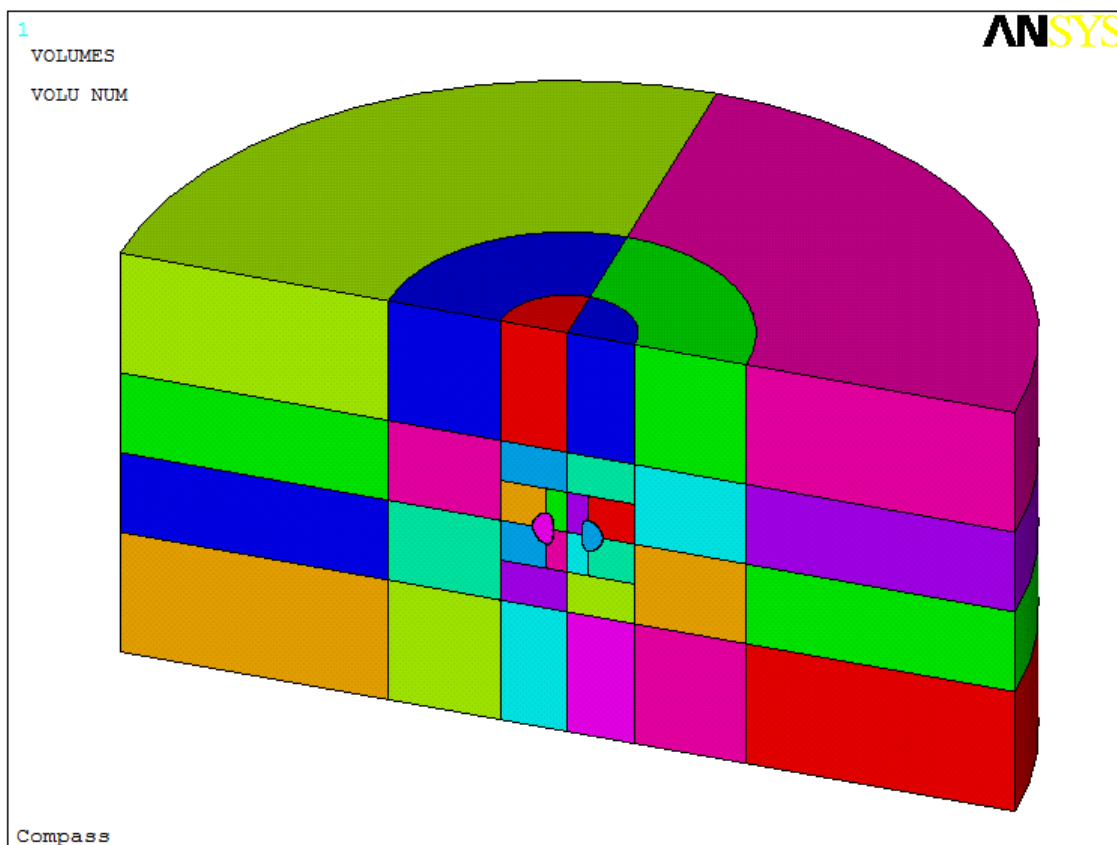


Obr. 31 Model komory v programu CAD



Obr. 32 Model komory v programu ANSYS

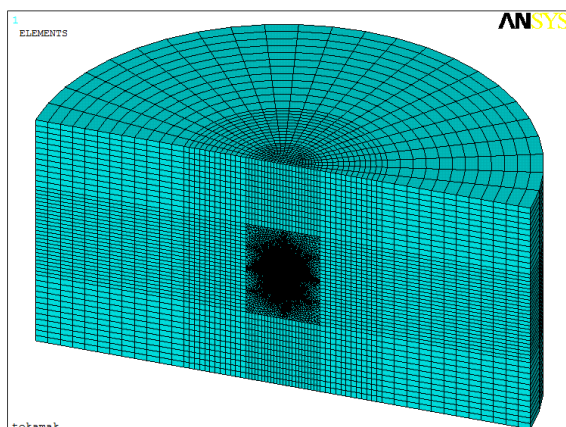
Dále byly definovány komponenty vnější okolí, vnitřní okolí, prostor cívek, vlastní komora a vakuum komory. Nadefinování komponentů je vhodné pro pozdější zjednodušení práce s modelem. Materiálům jednotlivých komponent byly přiřazeny jednotlivé materiálové konstanty.



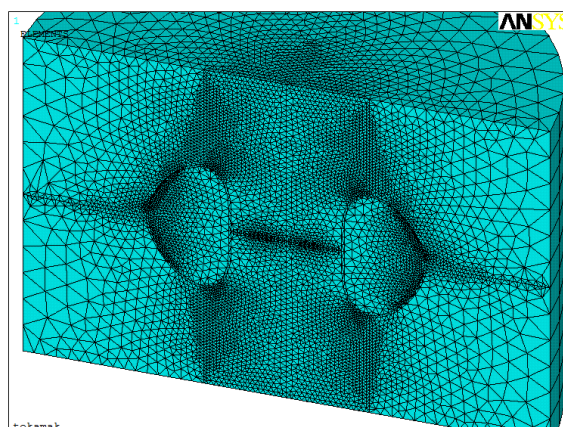
Obr. 33 Rozdělení objemů pro poloviční model

3.2.2 Vytvoření výpočetní sítě

Pro samotný výpočet bylo nutné vytvořit výpočetní síť. Model byl vymeshován pomocí čtyřstěnnů. Ukázky výpočetní sítě jsou na obrázku 34 a 35. Pro ukázkou jsem vybral polovinu celého modelu a detail těsného prostředí komory a cívek.



Obr. 34 Výpočetní síť pro polovinu modelu



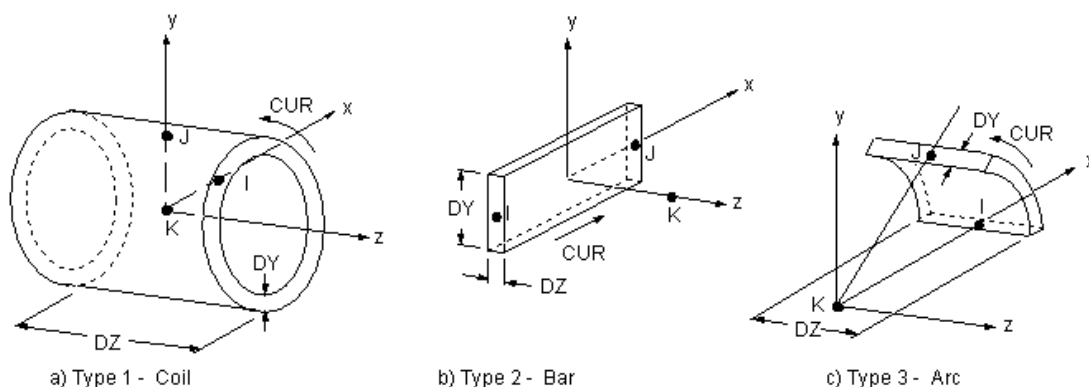
Obr. 35 Detail výpočetní sítě

Tab. 7 Parametry vakuové komory

Parametr		Jednotky	Rozměr
Rozměry			
Vedlejší rozměr		mm	-
Horizontální poloosa		mm	232
Vertikální poloosa		mm	385
Hlavní rozměr		mm	557
Tloušťka stěny		mm	3
Materiál			Inconel 625
Elektrické vlastnosti			
Toroidální odpor		mΩ	0,63
Poloidální odpor		μΩ	250
Časová konstanta		ms	0,3-0,6
Vlastnosti vakua			
Pracovní tlak		mbar	10.8
Teplota vypékání		°C	přibližně 200
Obsah komory		m ²	8
Objem komory		m ³	1
Rychlost pumpování		l.s ⁻¹	500
Poměr objem/rychlost		s	2
Přehled portů			
Horizontální	NW150		6
	nekruhový		2
Vertikální	NW100		-
	NW63		16
	nekruhový		16
Úhlový	NW100		10
	NW63		-
	nekruhový		1
Tangenciální	NW63		9
Porty celkem			60

3.2.3 Budící cívky

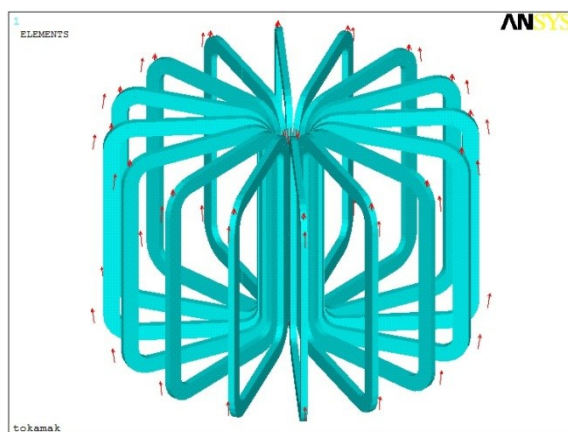
Model cívek byl realizován pomocí elementu SOURC36. Element řeší problematiku magnetických polí pomocí proudů a umožňuje vytvořit cívku pomocí předem nadefinovaných geometrických tvarů. Element může nabývat 3 typů tvaru, které jsou cívka, tyč a úhel. Z těchto tvarů, uvedených na obrázku 36, je možné vytvářet jejich vzájemné kombinace. Vstupními hodnotami elementu jsou proud tekoucí cívkou, počet závitů a geometrické rozměry cívky.



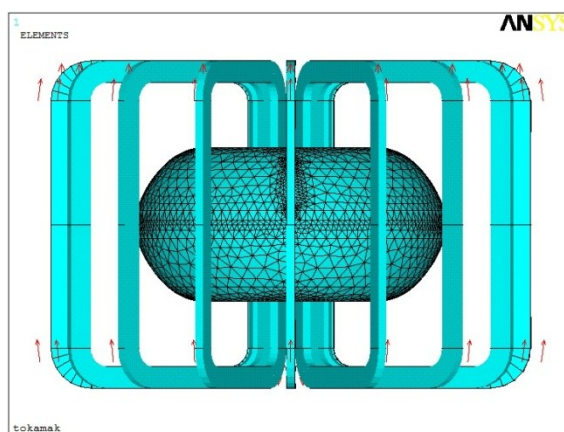
Obr. 36 Tři možné typy elementu SOURC36

3.2.3.1 Toroidální cívky

Obvod toroidálních cívek je tvořen 16 cívkami, které jsou navinuty v polodiální rovině. Zapojení cívek je sériové. Každá cívka je tvořena 4 vodiči. Cívky jsou rovnoměrně rozmístěny kolem celé komory, čemuž odpovídá natočení $22^{\circ} 30'$ podél osy Y. Podrobné parametry a umístění cívek je znázorněno v CD příloze 1.



Obr. 37 Model toroidálních cívek



Obr. 38 Toroidální cívky a komora

3.2.3.2 Poloidální cívky

V tokamaku je umístěno celkem 12 poloidálních cívek. Jejich přehled je uveden v CD příloze 2. Cívky jsou umístěny v horní a dolní polovině. Počet cívek znamená, zda je cívka společná pro horní a dolní polovinu poloidálních cívek nebo je zrcadlovou kopií cívek horních. Společné cívky jsou P1 a P7. Ostatní cívky jsou v tokamaku po dvou kusech.

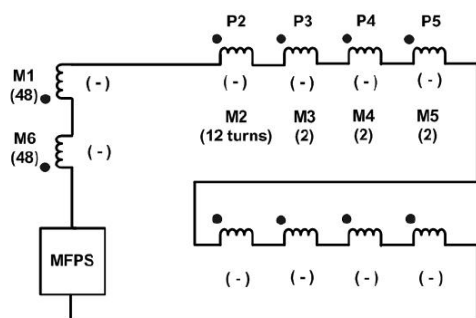
Jednotlivé cívky se skládají z více vinutí, vyjma cívky P7. Název vinutí a počet závitů je uveden v tabulce 8. [15]

Tab. 8 Přehled poloidálních cívek a vinutí.

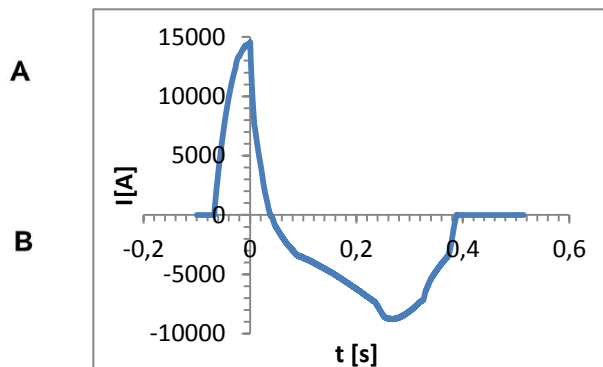
Cívka	Počet cívek	Počet vinutí	Název vinutí	Počet závitů
P1	1	2	M1	48
			M6	48
P2	2	3	M2	12
			F1	2
			S1	8
P3	2	4	M3	2
			F2	2
			F3	2
			S2	4
P4	2	4	M4	2
			F4	2
			S3	2
			S4	2
P5	2	4	M5	2
			E1	8
			E2	8
			E3	2
			F5	2
P6	2	2	S6	4
			S5	6
P7	1	1	S7	16

3.2.3.2.1 OH/MFPS

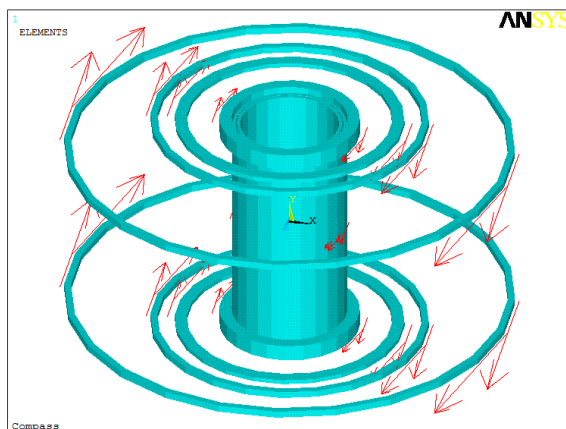
Zapojení se skládá z 10 jednotlivých vinutí zapojených do série. Tečka a znaménko reprezentují směr proudu. Znaménko + značí směr proudu jako kladný, který znamená, při pohledu na komoru tokamaku shora, levotočivý směr. Písmeno A značí vinutí nacházející se v horní polovině komory. Vinutí s označením B se nachází v dolní polovině komory. Všechna vinutí zapojení OH/MFPS jsou zapojena v pravotočivém směru proudu. [15]



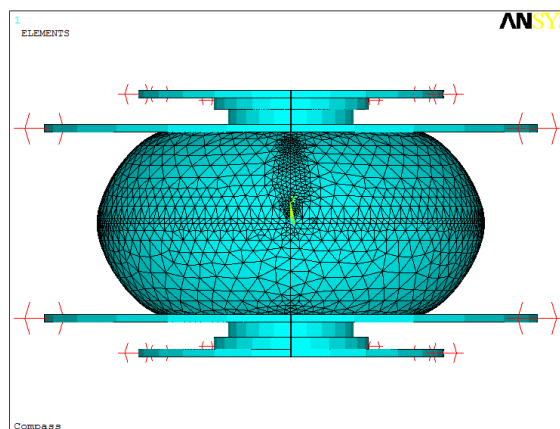
Obr. 39 Schéma zapojení jednotlivých vinutí



Obr. 40 Průběh proudu



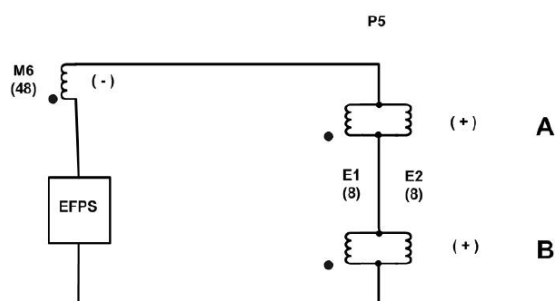
Obr. 41 Model OH/MFPS cívek



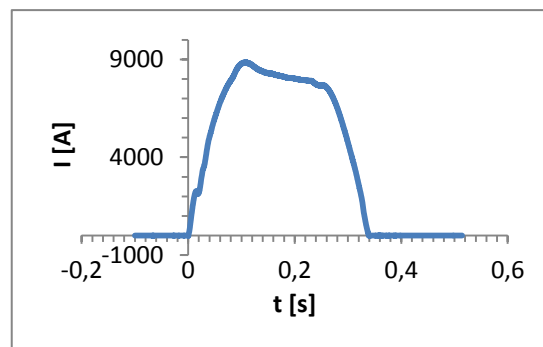
Obr. 42 OH/MFPS cívky a komora

3.2.3.2 EFPS

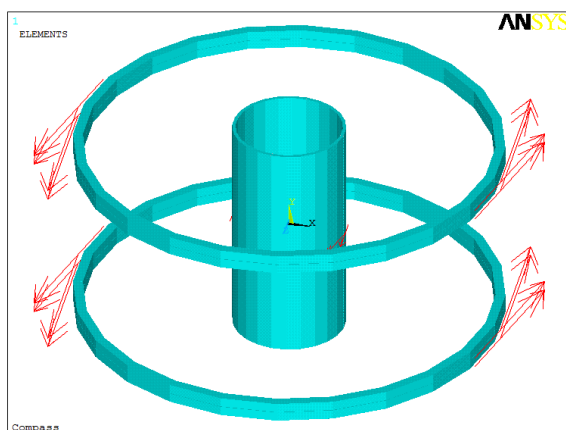
Obvod se skládá ze sério-paralelního zapojení vinutí. Vinutí M6 je zapojeno v sérii s paralelními kombinacemi vinutí E1 a E2. Vinutí M6 je zapojeno v pravotočivém směru proudu a vinutí E1A, E2A, E1B, E2B v levotočivém. [15]



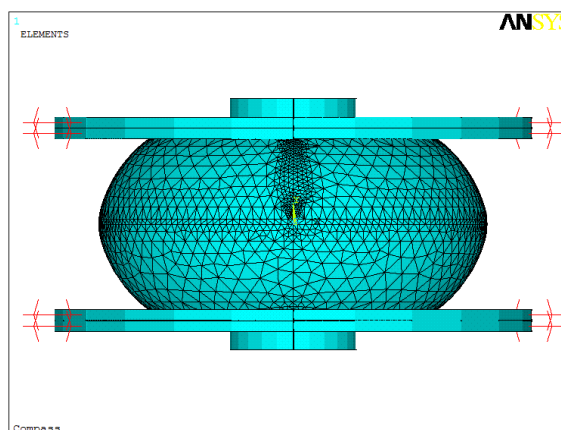
Obr. 43 Schéma zapojení vinutí EFPS.



Obr. 44 Průběh proudu



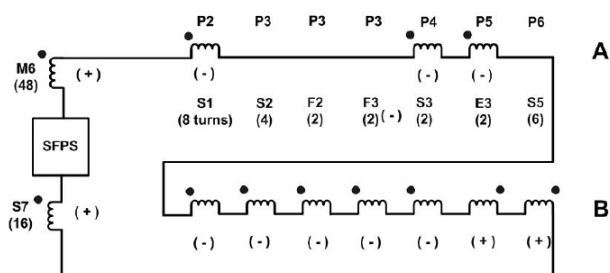
Obr. 45 EFPS cívky



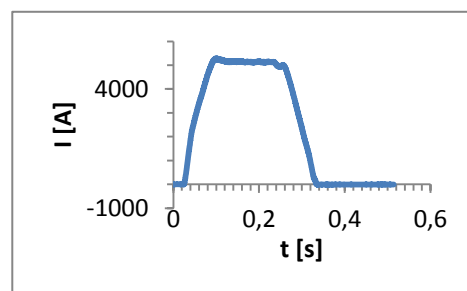
Obr. 46 EFPS cívky a komora

3.2.3.2.3 SFPS

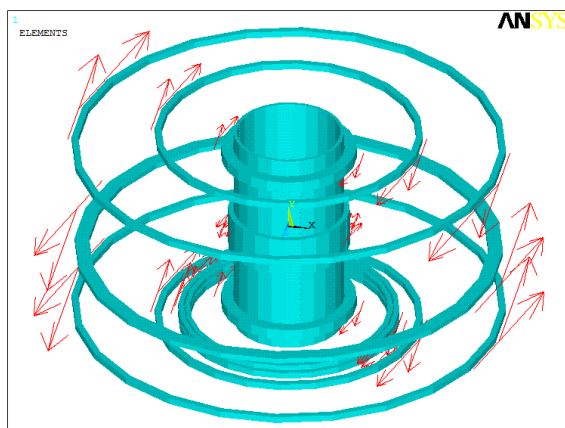
Pro modelovou situaci bylo zvoleno zapojení pro SNT plazma. Tvarovací vinutí je zapojeno v sériové kombinaci cívek. Vinutí M6, E3B, S5B a S7 jsou zapojeny v levotočivém směru proudu. Zbylá vinutí jsou zapojena v pravotočivém směru. Vinutí S2A, F2A, F3A a S5 jsou ve směru levotočivém. [15]



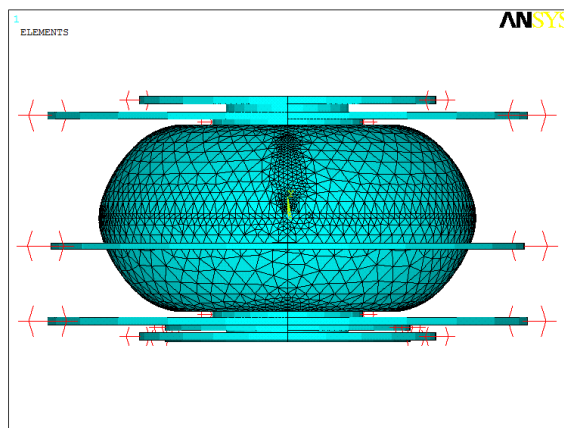
Obr. 47 Zapojení SFPS vinutí pro vytvoření SNT plazmatu



Obr. 48 Průběh proudu



Obr. 49 SFPS cívky

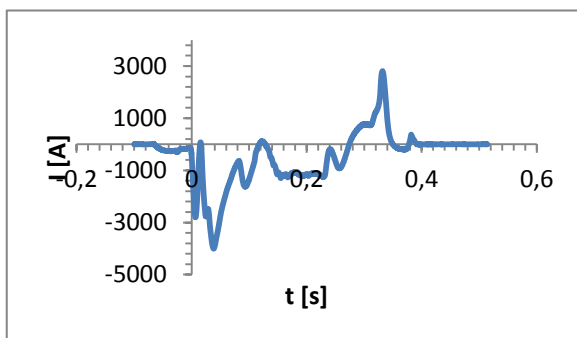


Obr. 50 SFPS cívky a komora

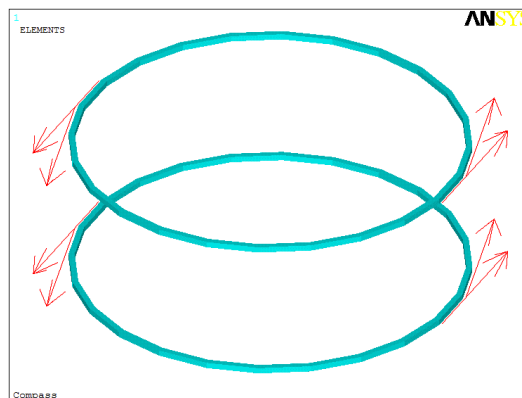
3.2.3.2.4 FFPS

3.2.3.2.4.1 BV

V obvodu je zapojeno pouze vinutí F5A a F5B, nalézající se v cívce P5. Vinutí jsou zapojena v levotočivém směru. [15]



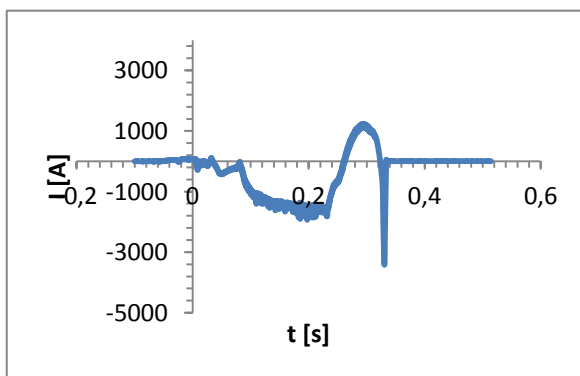
Obr. 51 Průběh proudu



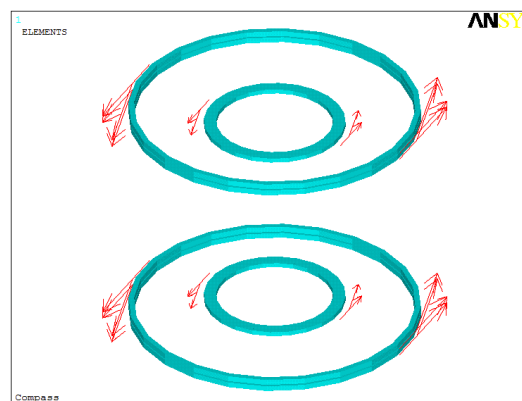
Obr. 52 Zapojení obvodu BV

3.2.3.2.4.2 BR

Obvod je složen z vinutí F4 a S4. Obě vinutí jsou v cívce P4. Dodatečně byla připojena cívka F1, která byla dříve umístěna v obvodu BV. Tím bylo dosaženo značného vylepšení homogenity u obvodu BR. [15]



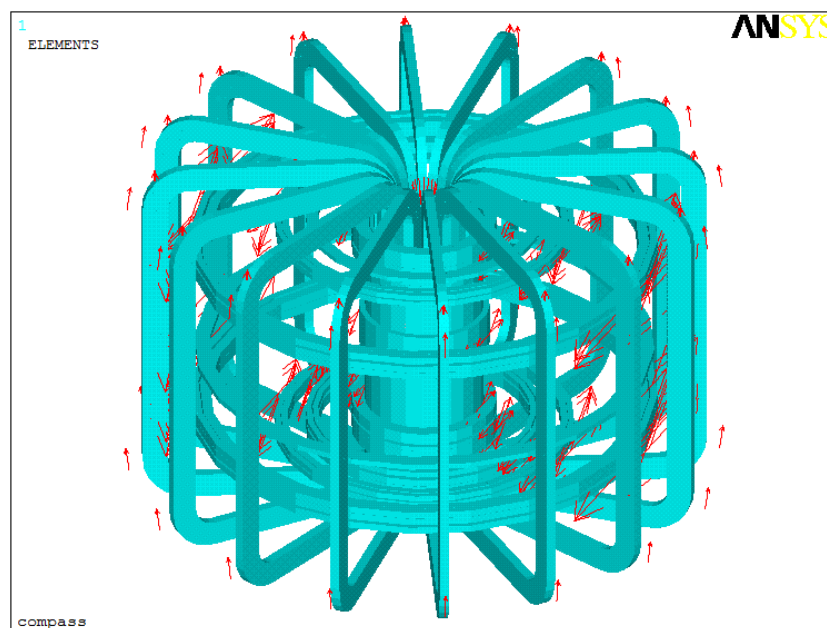
Obr. 53 Průběh proudu



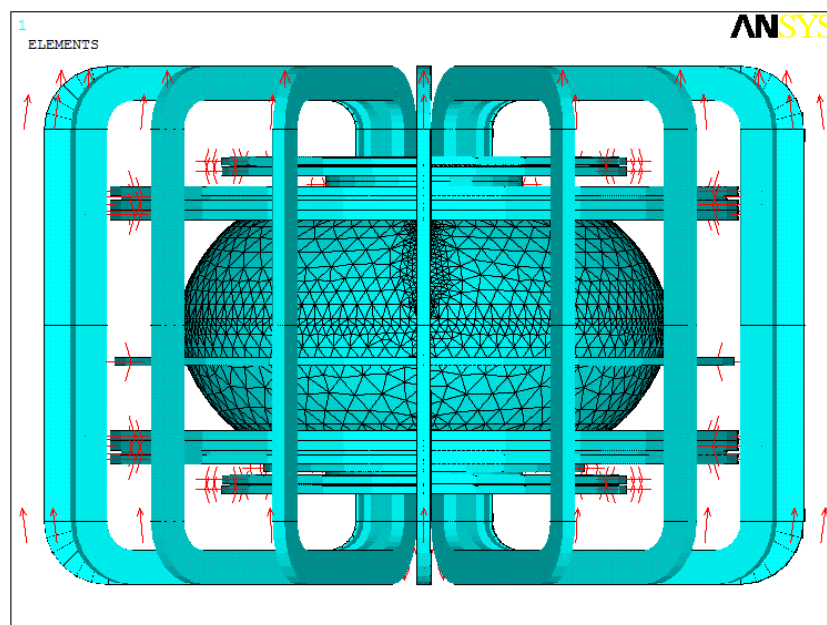
Obr. 54 Zapojení BR obvodu

3.2.3.3 Celkový model cívek

Kompletní model vznikl spojením všech výše uvedených obvodů. [15]



Obr. 55 Celkový model cívek



Obr. 56 Celkový model cívek a komora

4 SIMULACE MAGNETICKÉHO POLE

Výpočet byl prováděn pro 3D stacionární magnetické pole. V programu ANSYS byl proveden výpočet pomocí Biot-Savartova rozvoje, který popisuje magnetickou indukci vznikající díky pohybujícímu se náboji. Výpočtem byly získány hodnoty pro magnetickou indukci a intenzitu magnetického pole.

4.1 Přehled výpočtových proudů

4.1.1 Toroidální a poloidální cívky

Výpočet byl proveden v deseti krocích. Hodnoty proudu se pohybují od jedné desetiny maximálního proudu do hodnoty proudu maximálního. Gradient nárůstu proudu je pro všech deset kroků konstantní. V tabulce 9 je uveden přehled provedených výpočtů.

Tab. 9 Přehled výpočtových proudů.

Přehled provedených výpočtů			
Číslo výpočtu	Obvod cívek		Velikost maximálního proudu
1	Toroidální		100 kA
2	Poloidální	OH/MFPS	20 kA
3		EFPS	16 kA
4		SFPS	5,3 kA
5		BV	-4 kA
6		BR	-4 kA

4.1.2 Celkový model cívek

Výpočet provedený pro model kompletních cívek byl proveden pro odlišné hodnoty proudů, které jsou uvedeny v tabulce 10. V tomto případě byly použity reálné hodnoty proudů. Výpočet je proveden identicky, jako v předchozím případě, v 10 krocích.

Tab. 10 Přehled proudů celkového modelu cívek

Celkový model cívek			
Číslo výpočtu	Obvod cívek		Velikost maximálního proudu
7	Toroidální		92 kA
	Poloidální	OH/MFPS	18 kA
		EFPS	16 kA
		SFPS	5,3 kA
		BV	-4 kA
		BR	-4 kA

4.2 Přehled provedených výpočtů

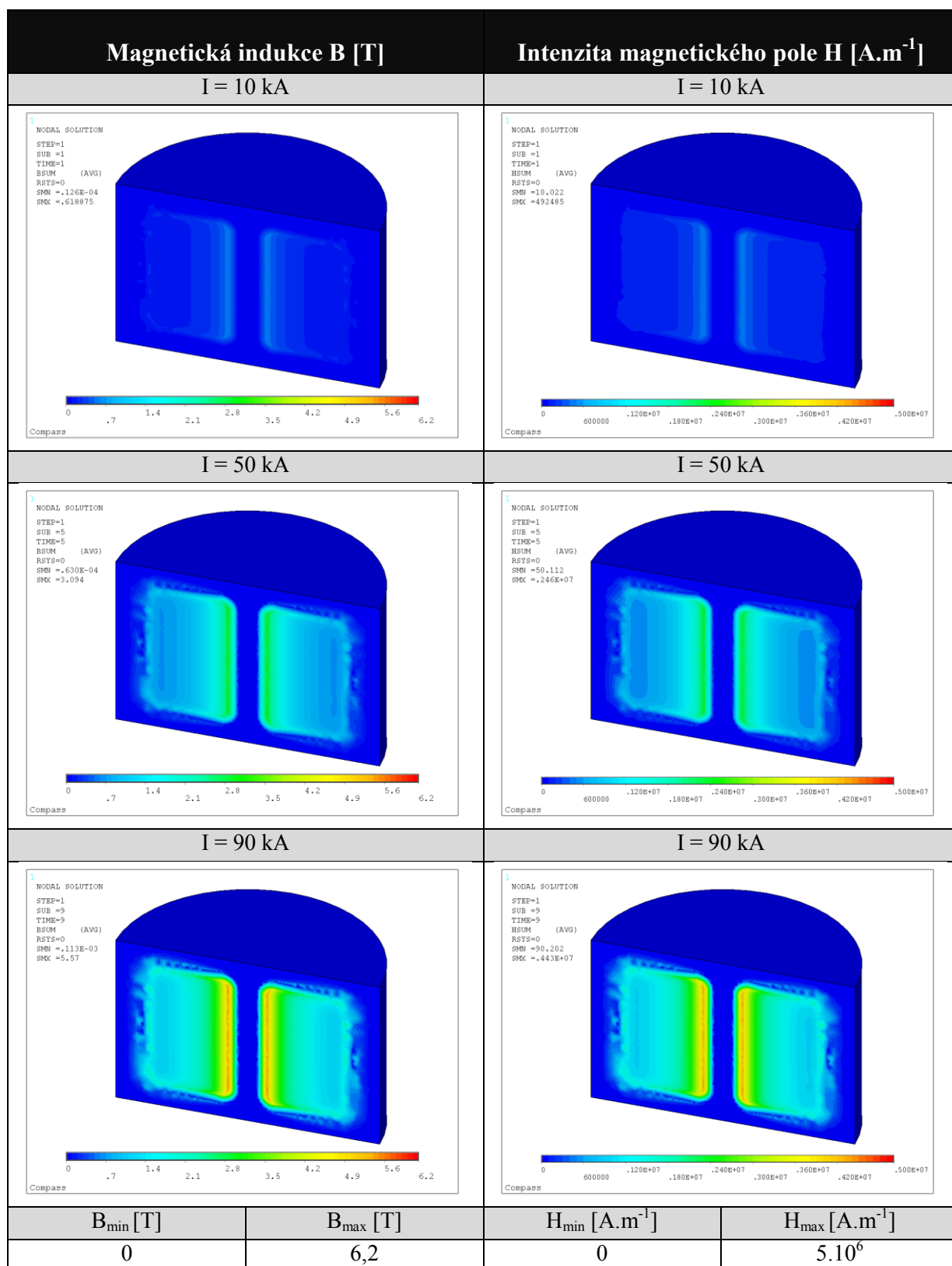
V tabulce 11 je uveden seznam provedených výpočtů

Tab. 11 Přehled provedených výpočtů

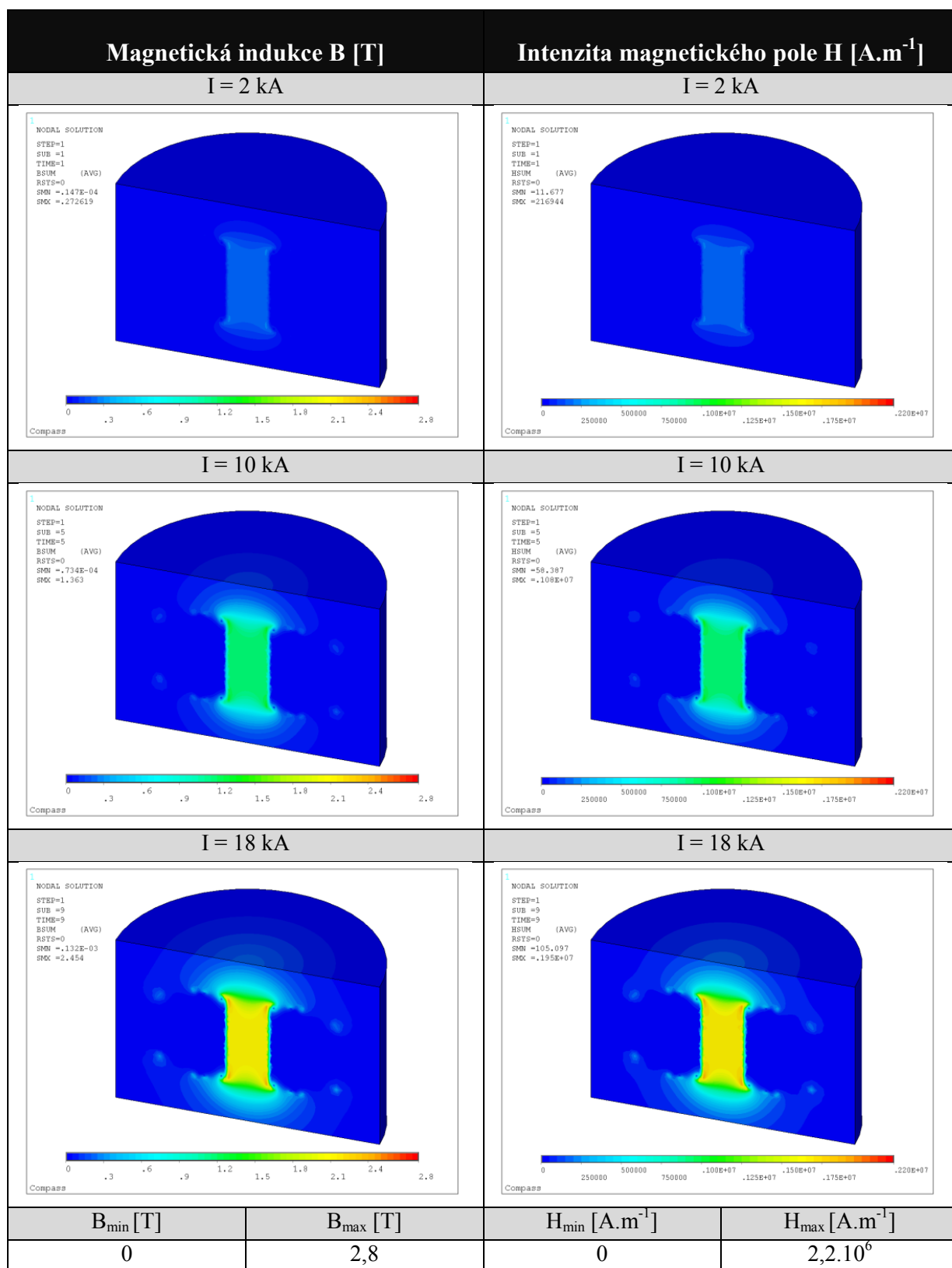
Přehled provedených výpočtů			
Označení výpočtu	Obvod cívek		Provedený výpočet
č.1a	Toroidální		Magnetická indukce
č.1b	Toroidální		Intenzita elektromagnetického pole
č.2a	Poloidální	OH/MFPS	Magnetická indukce
č.2b	Poloidální	OH/MFPS	Intenzita elektromagnetického pole
č.3a	Poloidální	EFPS	Magnetická indukce
č.3b	Poloidální	EFPS	Intenzita elektromagnetického pole
č.4a	Poloidální	SFPS	Magnetická indukce
č.4b	Poloidální	SFPS	Intenzita elektromagnetického pole
č.5a	Poloidální	BV	Magnetická indukce
č.5b	Poloidální	BV	Intenzita elektromagnetického pole
č.6a	Poloidální	BR	Magnetická indukce
č.6b	Poloidální	BR	Intenzita elektromagnetického pole
č.7a	Celkový model cívek		Magnetická indukce
č.7b	Celkový model cívek		Intenzita elektromagnetického pole

4.3 Výsledkový přehled

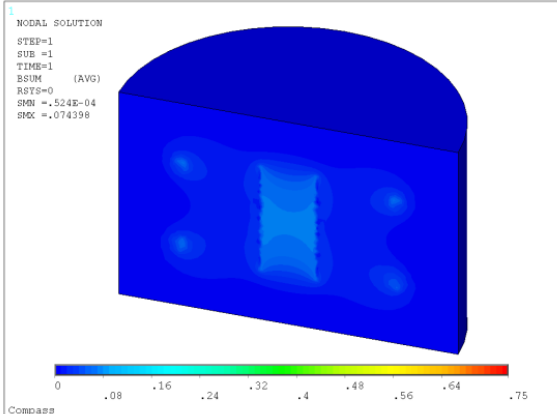
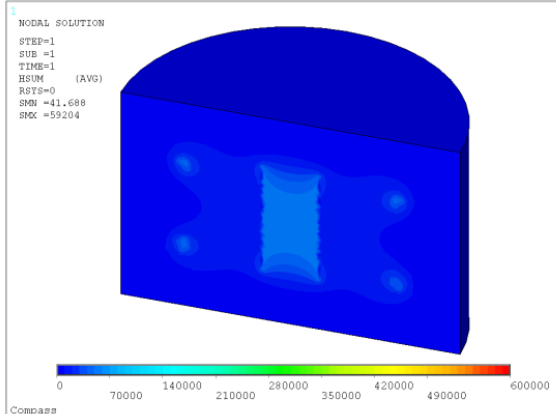
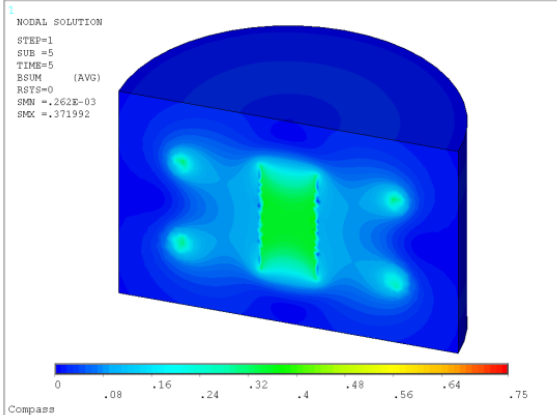
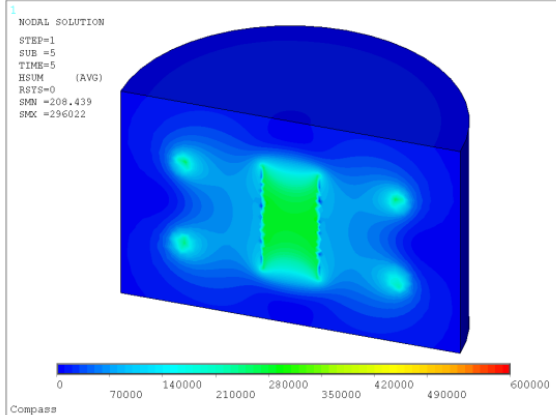
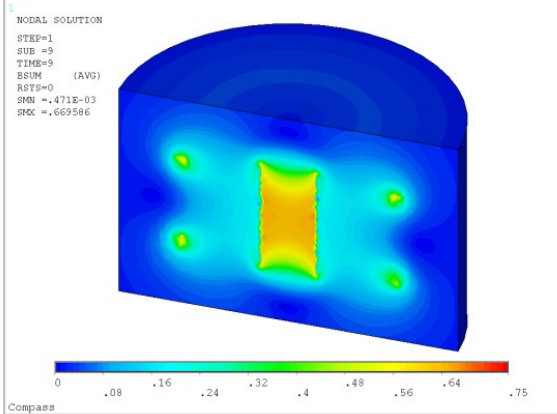
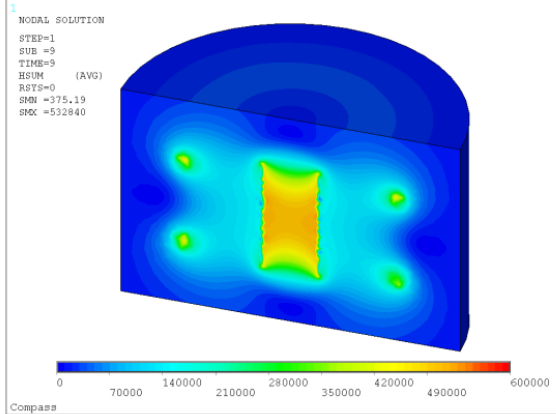
4.3.1 Výpočet č. 1



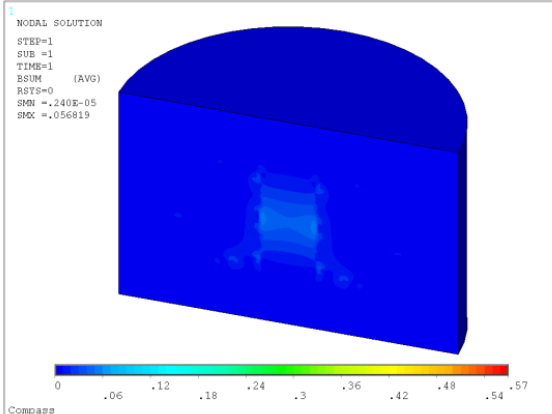
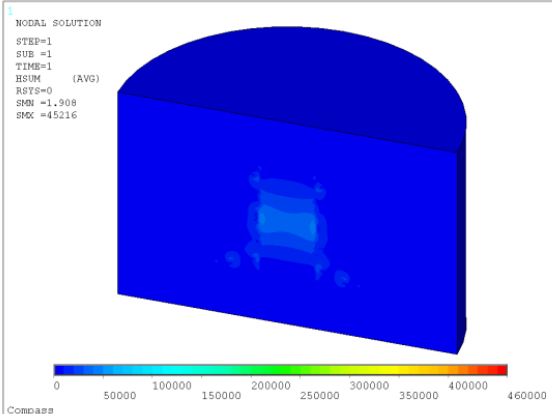
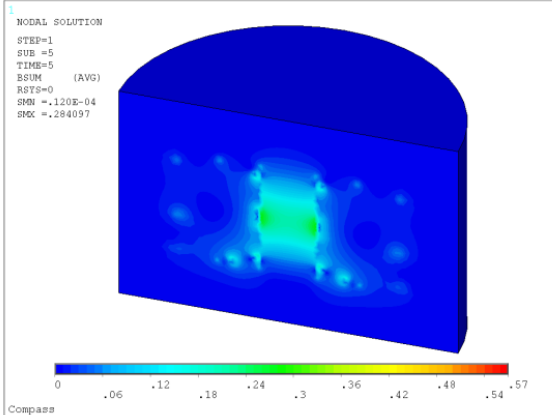
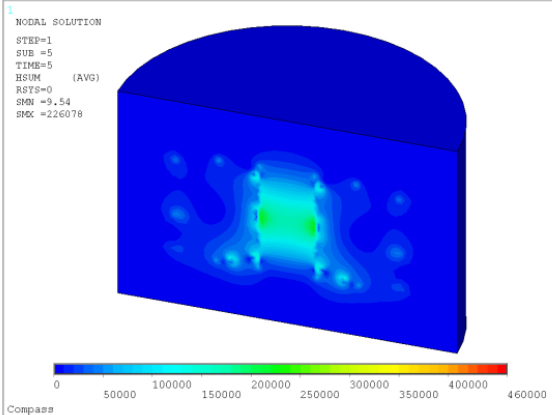
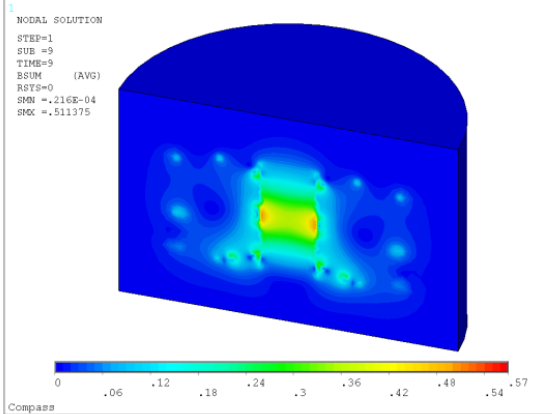
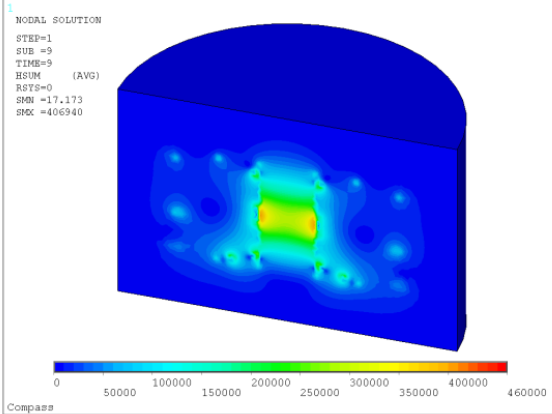
4.3.2 Výpočet č. 2



4.3.3 Výpočet č. 3

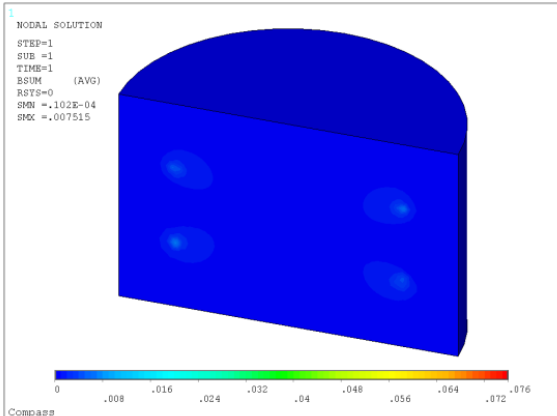
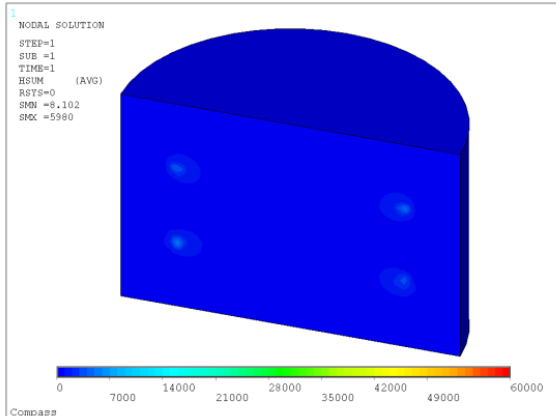
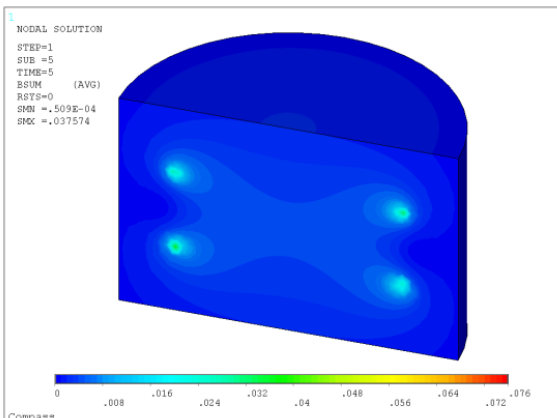
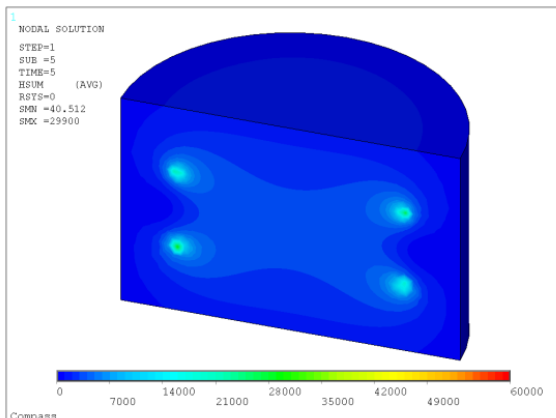
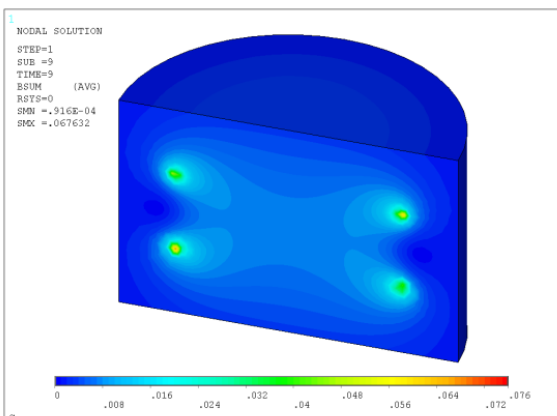
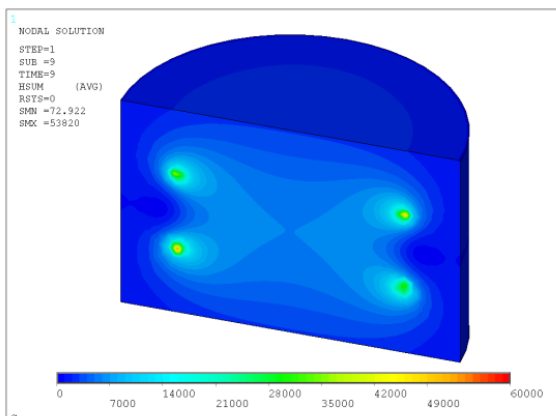
Magnetická indukce B [T]		Intenzita magnetického pole H [A.m ⁻¹]	
I = 1,6 kA		I = 1,6 kA	
 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 BSUM (AVG) RSTS=0 SMN =.524E-04 SMX =.074398</p>		 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 HSUM (AVG) RSTS=0 SMN =41.688 SMX =59204</p>	
I = 8 kA		I = 8 kA	
 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =5 TIME=5 BSUM (AVG) RSTS=0 SMN =.262E-03 SMX =.371992</p>		 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =5 TIME=5 HSUM (AVG) RSTS=0 SMN =208.439 SMX =296022</p>	
I = 14,4 kA		I = 14,4 kA	
 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =9 TIME=9 BSUM (AVG) RSTS=0 SMN =.471E-03 SMX =.669586</p>		 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =9 TIME=9 HSUM (AVG) RSTS=0 SMN =375.19 SMX =532840</p>	
B _{min} [T]		H _{min} [A.m ⁻¹]	
0		0	
B _{max} [T]		H _{max} [A.m ⁻¹]	
0,75		6.10 ⁵	

4.3.4 Výpočet č. 4

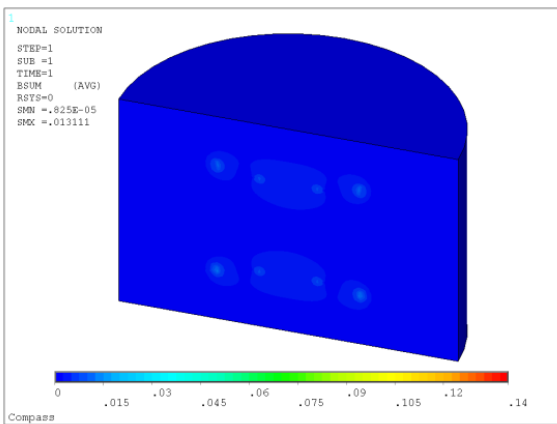
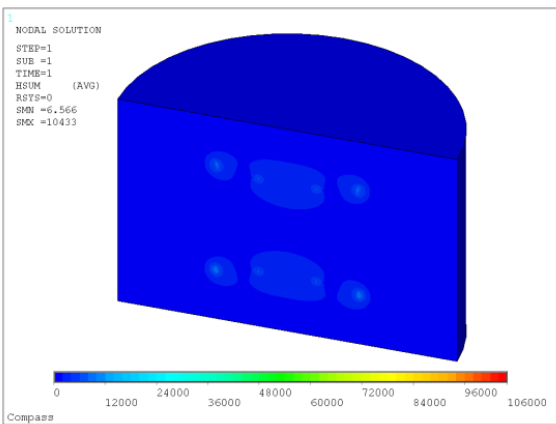
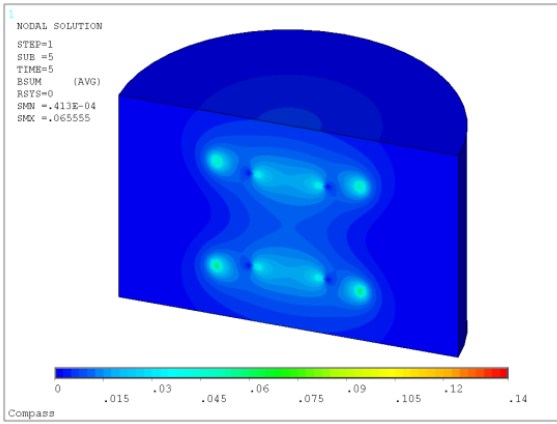
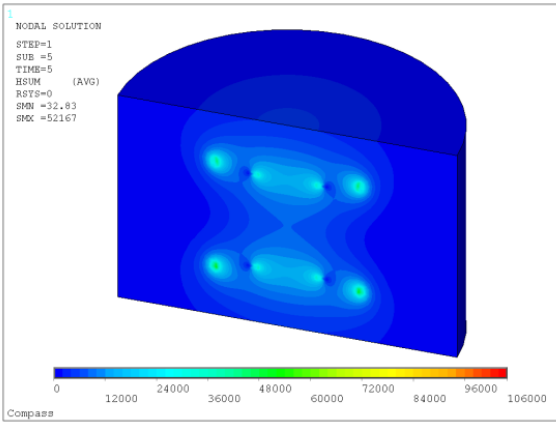
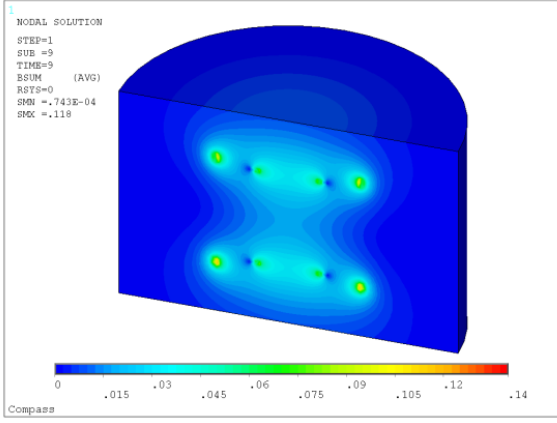
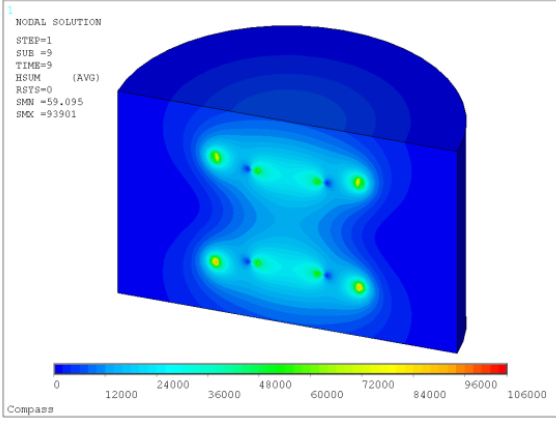
Magnetická indukce B [T]		Intenzita magnetického pole H [A.m ⁻¹]	
I = 530 A		I = 530 A	
 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 BSUM (AVG) RSTS=0 SMN =.240E-05 SMX =.056819</p> <p>0 .06 .12 .18 .24 .3 .36 .42 .48 .54 .57</p> <p>Compass</p>		 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 HSUM (AVG) RSTS=0 SMN =1.908 SMX =45216</p> <p>0 50000 100000 150000 200000 250000 300000 350000 400000 460000</p> <p>Compass</p>	
I = 2,65 kA		I = 2,65 kA	
 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =5 TIME=5 BSUM (AVG) RSTS=0 SMN =.120E-04 SMX =.284097</p> <p>0 .06 .12 .18 .24 .3 .36 .42 .48 .54 .57</p> <p>Compass</p>		 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =5 TIME=5 HSUM (AVG) RSTS=0 SMN =9.54 SMX =226078</p> <p>0 50000 100000 150000 200000 250000 300000 350000 400000 460000</p> <p>Compass</p>	
I = 4,77 kA		I = 4,77 kA	
 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =9 TIME=9 BSUM (AVG) RSTS=0 SMN =.216E-04 SMX =.511375</p> <p>0 .06 .12 .18 .24 .3 .36 .42 .48 .54 .57</p> <p>Compass</p>		 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =9 TIME=9 HSUM (AVG) RSTS=0 SMN =17.173 SMX =406940</p> <p>0 50000 100000 150000 200000 250000 300000 350000 400000 460000</p> <p>Compass</p>	
B _{min} [T]		H _{min} [A.m ⁻¹]	
0		0	
B _{max} [T]		H _{max} [A.m ⁻¹]	
0,57		4,6.10 ⁵	

/

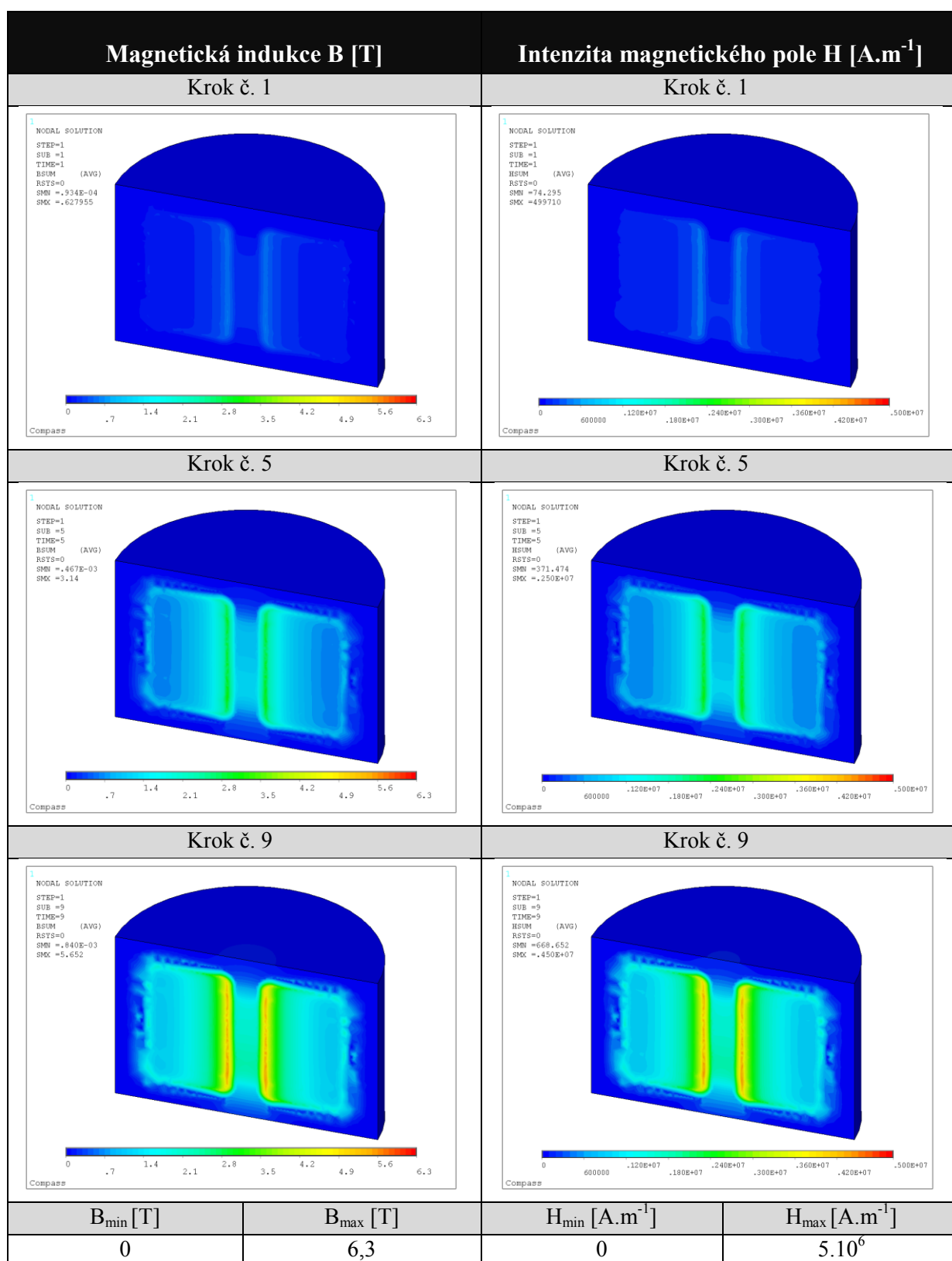
4.3.5 Výpočet č. 5

Magnetická indukce B [T]		Intenzita magnetického pole H [A.m ⁻¹]	
I = 400 A		I = 400 A	
			
I = 2 kA		I = 2 kA	
			
I = 3,6 kA		I = 3,6 kA	
			
B _{min} [T]		H _{min} [A.m ⁻¹]	
0		0	
B _{max} [T]		H _{max} [A.m ⁻¹]	
7,6.10 ⁻²		6.10 ⁴	

4.3.6 Výpočet č. 6

Magnetická indukce B [T]		Intenzita magnetického pole H [A.m ⁻¹]	
I = 400 A		I = 400A	
 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 BSUM (AVG) RSTS=0 SMN =.825E-05 SMX =.013111</p>		 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 HSUM (AVG) RSTS=0 SMN =6.566 SMX =10433</p>	
I = 2 kA		I = 2 kA	
 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =5 TIME=5 BSUM (AVG) RSTS=0 SMN =.413E-04 SMX =.065555</p>		 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =5 TIME=5 HSUM (AVG) RSTS=0 SMN =32.83 SMX =52167</p>	
I = 3,6 kA		I = 3,6 kA	
 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =9 TIME=9 BSUM (AVG) RSTS=0 SMN =.743E-04 SMX =.118</p>		 <p>1 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =9 TIME=9 HSUM (AVG) RSTS=0 SMN =59.095 SMX =93901</p>	
B _{min} [T]		H _{min} [A.m ⁻¹]	
0		0	
B _{max} [T]		H _{max} [A.m ⁻¹]	
0,14		1,06.10 ⁵	

4.3.7 Výpočet č. 7



Hodnoty proudů pro jednotlivé kroky jsou uvedeny v tabulce viz CD příloha 13 a 14.

5 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce jsem se zabýval 3D statickou analýzou elektromagnetického pole tokamaku Compass D. Nejprve jsem vytvořil 3D model komory, okolního prostředí a cívek. Cívky byly vytvářeny podle výkresové dokumentace zaslané z ÚFP AV ČR. Cívky toroidálního pole museli být díky svému složitému tvaru v oblasti solenoidu mírně upraveny. Poloidální se zcela shodují se skutečností.

Výpočty jsem provedl pro 3D statické elektromagnetické pole dle přehledu, který je uveden v tabulce 11. Výsledkový přehled jsem vytvořil pro hodnoty magnetické indukce a intenzity elektromagnetického pole. Proud, použité pro výpočet jednotlivých obvodů, jsou uvedeny v tabulce 9. Pro celkový model cívek jsou uvedeny v tabulce 10.

Hodnoty vypočtené magnetické indukce toroidálních cívek pro velikost proudu 90 kA (výsledkový přehled č.1a graf 9) se shodují s uváděnou hodnotou 0,8 T až 2,1 T (tabulka 2). Vypočtená hodnota magnetické indukce pro horizontální magnetické pole (výsledkový přehled č.6a) se přibližně shoduje s uváděnou hodnotou 10 mT (tabulka 4). Hodnota vypočtená pro vertikální magnetické pole (výsledkový přehled č.5a) se s uváděnou hodnotou 200 mT (viz tabulka 4) neshoduje. Zbývající vypočtené hodnoty nebylo možné ověřit, protože nejsou nikde zveřejněny.

Mapy rozložení intenzity magnetického pole se téměř shodují s mapami rozložení magnetické indukce, to je dáno lineární závislostí mezi těmito dvěma veličinami. Při výpočtu byla uvažována stejná permeabilita pro celý model. Skutečné hodnoty mi nejsou známy.

Tvorba a simulace tohoto modelu byla má první práce v programu ANSYS. Množství obvodů cívek zapříčinilo dlouhou dobu výpočtu a vykreslování výsledků. Pomocí čtyřprocesorové stanice byl výpočet proveden za 2 dny a za stejnou dobu byly vykresleny výsledky.

Vytváření modelu bylo pro mě v začátcích složitou záležitostí, ale díky pomoci mého vedoucího diplomové práce jsem ji zdárně zvládl. S postupným prohlubováním mých znalostí modelování v programu ANSYS jsem objevil některé slabiny této simulace. Jako první bych zmínil využití jiného typu elementu umožňujícího vytvořit mapovanou výpočetní síť, s kterou je možné dosáhnout lepšího výsledku. Další slabinu by bylo možné eliminovat znalostí přesného uspořádání tokamaku Compass D, především jeho komory, a jeho materiálových vlastností. Použitím reálných průběhů proudů v závislosti na čase by mohlo rovněž přispět k přesnějšímu výsledku. V neposlední řadě by bylo vhodné vytvořit přesný model toroidálních cívek.

Tvorba této diplomové práce byla pro mě velkým přínosem. Prohloubil jsem si znalosti týkající se problematiky tokamaků a termojaderné syntézy, naučil jsem se postup, jak vytvářet modely a řešit úlohy pomocí programu ANSYS. Problematice tokamaků a modelování elektromagnetických cívek v programu ANSYS bych se chtěl nadále zabývat v rámci doktorského studia. Pro mnoho lidí obhájením diplomové práce končí určitá část jejich života, ale pro mě teprve začíná.

6 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] WESSON, John. *Tokamaks*. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press, 2004. 749 s. ISBN 978-0-19-850922-6.
- [2] CHEN, Francis F. *PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION: Volume 1: Plasma Physic*. 2nd ed. Los Angeles, California : Springer, 2006. 421 s. ISBN 0-306-41332-9.
- [3] WOODS, L. C. *Theory of Tokamak Transport: New Aspect for Nuclear Fusion Reactor Design*. Oxford, GB : Wiley-VCH, 2006. 224 s. ISBN 3-527-40625-5.
- [4] MCCRACKEN, Garry; STOTT, Peter. *FÚZE: Energie vesmíru*. Vyd. 1. Praha: Edice Kolumbus, 2006. 328 s. ISBN 80-204-1453-3.
- [5] GROSS, Boleslav. *Technika plazmatu*. Vyd. 1. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1985. 117 s.
- [6] ŘÍPA, M., et al. *Řízená termojaderná syntéza pro každého*. Milan Řípa; Ústav fyziky plazmatu AV ČR, ČTK. 2. vyd. Praha : [s.n.], 2005. 98 s.
- [7] BEŇO, Radek. *Řízení tokamaku COMPASS*. Praha, 2011. 86 s. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z WWW: <http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/4/49/Dp_2011_beno_radek.pdf>.
- [8] ANTL, Marek. *Napájecí soustava s pulsními generátory pro tokamak Compass D*. Brno, 2008. 80 s. Diplomová práce. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně.
- [9] *Wikipedie* [online]. 2011-03-22 [cit. 2011-05-05]. Fyzika plazmatu. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fyzika_plazmatu>.
- [10] KULHÁNEK, Petr. *Teorie plazmatu*. Praha: FJFI ČVUT, 2009. 261 s.]
- [11] *Cez.cz* [online]. c2011 [cit. 2011-02-15]. Termonukleární reaktory. Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/reaktory_9.html>.
- [12] *Osel.cz* [online]. 2008 [cit. 2010-11-22]. Kdy se bude jaderná fúze využívat pro výrobu energie?. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=4120&akce=show2&dev=1>>.
- [13] *Www.ipp.mpg.de* [online]. 2009 [cit. 2010-12-11]. Wendelstein 7-X Physical and Technical Objectives. Dostupné z WWW: <<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/for/projekte/w7x/ziele/index.html>>.

- [14] *Www.jet.efda.org/* [online]. c 2001 - 2011 [cit. 2011-01-16]. Dostupné z WWW: <www.jet.efda.org/>.
- [15] *Enabling a programme of ITER relevant plasma studies by transferring and installing COMPASS-D to the Institute of Plasma Physics AS CR, Association EURATOM-IPP.CR. : Phase II.* Praha : Institute of Plasma Physics, Prague, Czech Republic, . 115 s.
- [16] *Conventional Tokamaks* [online]. 2010 [cit. 2010-12-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.toodlepip.com/tokamak/conventional-large-tokamaks.htm>>.
- [17] *Techtydenik.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-01-03]. Tokamak COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky. Dostupné z WWW: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=5370&mark=compass>>.
- [18] *EUROATOM-IPP.CR* [online]. 2010 [cit. 2010-10-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/euratom/?lang=cs>>.
- [19] HAUPTMANN, Radim. *Energetické zdroje pro tokamak compass.* Praha: ČVUT, 2008. 4 s.
- [20] ŘÍPA, Milan; PÁNEK, Radomír; MLYNÁŘ, Jan. Instalace tokamaku COMPASS v Praze. In *Čs. čas. fyz. 58.* [s.l.] : [s.n.], 2008. s. 8.
- [21] *Autodesk.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-02-21]. AutoCAD. Dostupné z WWW: <<http://www.autodesk.cz/adsk/servlet/pc/index?siteID=551663&id=14600953>>.
- [22] *Lmfp.vsb.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-03-14]. Laboratoř modelování fyzikálních polí. Dostupné z WWW: <<http://lmfp.vsb.cz/>>.
- [23] BŘEZINA, Antonín. *Tokamaky a termonukleární reaktory – Průzkum současné úrovně.* Ostrava, 2009. 51 s. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [24] *ANSYS* [online]. 2011 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.ansys.com/>>.

SEZNAM CD PŘÍLOH

CD příloha 1	Uspořádání toroidálních cívek.jpg
CD příloha 2	Uspořádání poloidálních cívek.jpg
CD příloha 3	č.1a
CD příloha 4	č.1b
CD příloha 5	č.2a
CD příloha 6	č.2b
CD příloha 7	č.3a
CD příloha 8	č.3b
CD příloha 9	č.4a
CD příloha 10	č.4b
CD příloha 11	č.5a
CD příloha 12	č.5b
CD příloha 13	č.6a
CD příloha 14	č.6b
CD příloha 13	č.7a
CD příloha 14	č.7b